ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 25

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 25

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2026

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O482e

Engenharia, Gestão e Inovação - Volume 25 / Organização: Aline Mara Oliveira, Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 199 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-662-2
DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Gestão 3. Inovação. 1. OLIVEIRA, Aline Mara 2. GUIMARÃES, Osvaldo Sena 3. Título

CDD-620

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Diagnóstico e priorização de manifestações patológicas em edificações públicas: Estudo de Caso no IFMA Campus Alcântara..... 06

Rômulo César de Araújo Azevedo, Mayssa Alves da Silva, Jorge Creso Cutrim Demétrio, Rodrigo de Azevedo Neves

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.01

Capítulo 2: Argamassa com adição de polímeros reciclados..... 33

Wagner Roberto Santos dos Santos, Renan Antunes Costa, Miguel Rodrigues Paschoal, Jefferson Dias Gonçalves, Jesse Luis Padilha

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.02

Capítulo 3: Substituição de madeira de alta durabilidade por polímero reciclado em batentes: uma abordagem experimental e aplicada..... 41

Fernando Gonçalves, Viviane Teleginski Mazur, Maurício Marlon Mazur, Marcelo Henrique Granza, Anderson Amaro Turri, Nikelan Rox, Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.03

Capítulo 4: Uso da casca de mamona como alternativa sustentável para Economia Circular no campo..... 57

Tatiana de Freitas Silva, Nathalia Vieira Barbosa, João Otávio Costa Almeida, Wesley Wagner de Melo Lopes

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.04

Capítulo 5: Aplicação da glicerina pós-transesterificação na síntese de biopolímeros 75

Tatiana de Freitas Silva, Nathalia Vieira Barbosa, Luis Gustavo Ferreira Anastácio

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.05

Capítulo 6: Corrosão em ambientes refrigerados: análise de casos e seus impactos na indústria de alimentos..... 90

Bruno Silva Sacramento, Fernando Nunes da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.06

Capítulo 7: Influence of cryolite ratio on phase formation and reactivity of aluminosilicate refractories: a thermodynamic study using factSage 106

Paulo Emilio Tavares, Ivan Mauricio Daza Prada, Cesar Yugi Narita, Catia Fredericci

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.07

Capítulo 8: Nanocompósitos de hidroxiapatita revestida com quitosana em matriz de PLGA: caracterização e desempenho biológico..... 114

Lailla Daianna Soltau Missio Pinheiro, Marcelo Lovato Brum

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.08

SUMÁRIO

Capítulo 9: Utilização de vegetais típicos da Amazônia para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis: uma revisão bibliográfica das publicações nos últimos dez anos 123

Dewid Bruno da Silva Dias, Fernando Nunes da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.09

Capítulo 10: Análise da expansão e da evolução tecnológica da energia solar no Brasil 135

Paulo Alves Garcia

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.10

Capítulo 11: Desenvolvimento de um programa simplificado em Python para o cálculo de estágios em colunas de destilação binária via Método de McCabe-Thiele 141

Raphaela Barreto Venancio, Sidinei Kleber da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.11

Capítulo 12: Using mathematical and statistical tools for problem solving (Case Studies). 162

Hugo Pimentel Tavares, Ariane Menezes Ayres, Luiz Filippe Cardoso Botelho, Carlos Augusto da Silva Marins, Ariane Ferreira Gonçalves, Michelle França Rabelo Cunha, Diogenes da Silva Oliveira, Adriana Brasil Vargas, Flavia Tostes Fontes de Andrade, Nilo Antonio de Souza Sampaio

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.12

Capítulo 13: Avaliação do impacto do tamanho amostral na síntese de dados tabulares via CTGAN para problemas de regressão: um estudo de prova de conceito em cenário controlado 169

Rosalvo Ferreira de Oliveira Neto

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.13

Capítulo 14: Riscos psicossociais no trabalho: conceitos, complexidade de identificação e o nexo causal com o ambiente laboral 182

José Antonio Poletto Filho, Vanessa Aparecida Sanches Campassi de Oliveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-662-2.CAP.14

Autores 191

Capítulo 1

Diagnóstico e priorização de manifestações patológicas em edificações públicas: Estudo de Caso no IFMA Campus Alcântara

Rômulo César de Araújo Azevedo
Mayssa Alves da Silva
Jorge Creso Cutrim Demétrio
Rodrigo de Azevedo Neves

Resumo: Este trabalho investiga as manifestações patológicas observadas nas edificações do Instituto Federal do Maranhão - Campus Alcântara, com o propósito de identificar suas origens, classificações e propor intervenções corretivas e preventivas. A metodologia adotada incluiu inspeções visuais em campo, documentação fotográfica, consulta a normas técnicas e bibliografia especializada, além da aplicação da Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) para estabelecer prioridades de intervenção. As manifestações patológicas mais recorrentes foram fissuras, infiltrações, eflorescência, desplacamento de revestimentos cerâmicos, bolor e mofo, recalque diferencial, carbonatação e corrosão de armaduras. Os dados indicam que o recalque diferencial apresentou os maiores índices de gravidade e urgência, enquanto infiltrações e rachaduras nas paredes foram as ocorrências mais comuns nos blocos avaliados, cada uma com 16,67% de incidência. Verificou-se que as causas predominantes se relacionam à ausência de manutenção preventiva, falhas de execução, deficiências construtivas e influência do ambiente costeiro. Conclui-se que a implantação de rotinas de manutenção sistemática, a utilização de materiais adequados e o cumprimento das normas técnicas são essenciais para assegurar a durabilidade e o desempenho das edificações, salientando a importância do diagnóstico precoce e da gestão eficiente do patrimônio público.

Palavras-chave: Manifestações patológicas, Edificações, Matriz GUT, Manutenção preventiva.

1. INTRODUÇÃO

As patologias nas construções correspondem a manifestações que surgem ao longo do tempo e comprometem o desempenho das edificações. Essas ocorrências manifestam-se como manchas, trincas, infiltrações ou, em situações mais graves, por falhas estruturais. Em geral, decorrem da interação de diversos fatores, tais como deficiências de projeto, erros durante a execução, omissão da manutenção preventiva e uso inadequado da edificação (Souza; Ripper, 1998).

A umidade nas paredes raramente é apenas um problema estético; frequentemente resulta de falhas construtivas ou de manutenção. Essas manifestações podem originar-se de problemas em sistemas de impermeabilização, infiltrações pela cobertura ou deficiência na drenagem das águas pluviais. Segundo Tutikian (2011), a atuação contínua da umidade acelera a degradação dos materiais, favorecendo o surgimento de fungos, a deterioração de elementos construtivos e a corrosão das armaduras, sobretudo em estruturas de concreto armado.

Entre as manifestações mais comuns estão as trincas, que podem decorrer de movimentações naturais da estrutura, recalques do terreno ou erros de execução. Embora muitas fissuras sejam superficiais, em certas situações podem indicar problemas mais sérios, requerendo avaliação técnica especializada (Thomaz, 2019).

A ocorrência de patologias em edificações não significa, necessariamente, que a construção esteja estruturalmente comprometida, porém representa sinais que exigem investigação técnica cuidadosa. Conforme destacam Garcia e Albuquerque (2019), a ausência de um diagnóstico adequado compromete a eficácia das intervenções, uma vez que soluções aplicadas sem a correta identificação das causas tendem a atuar apenas sobre os efeitos aparentes, favorecendo a reincidência dos problemas e o aumento dos custos de manutenção.

Edificações destinadas a atividades educacionais precisam proporcionar condições adequadas de uso, segurança e conforto, já que sua qualidade impacta diretamente as rotinas acadêmicas e administrativas. No IFMA Campus Alcântara, verificou-se a presença de diversas manifestações patológicas em múltiplos espaços institucionais, abrangendo o bloco administrativo, o bloco educacional, o refeitório, o auditório e a quadra poliesportiva. A ocorrência dessas manifestações em várias áreas evidencia a necessidade de avaliação técnica mais aprofundada e abrangente do conjunto de edificações do campus.

A repetição dessas manifestações compromete não apenas o desempenho dos sistemas construtivos, mas também afeta o aspecto estético e funcional cotidiano da instituição. Infiltrações, fissuras, desplacamentos e outras patologias, quando não identificadas e tratadas adequadamente, tendem a se intensificar com o tempo, elevando os custos de recuperação e podendo representar riscos à integridade física dos usuários.

Entender os mecanismos que originam essas ocorrências é, portanto, fundamental para a proposição de soluções técnicas mais eficazes e duradouras. Além da relevância técnica, o estudo das manifestações patológicas em edificações públicas de ensino possui importância social e institucional. Ambientes degradados podem prejudicar o processo de ensino-aprendizagem e deteriorar as condições de trabalho de servidores e colaboradores. Assim, a melhoria das condições físicas contribui para ambientes mais adequados às atividades educacionais, influenciando positivamente a percepção dos usuários e a valorização da instituição.

Assim, este trabalho justifica-se pela importância técnica e científica da análise das manifestações patológicas, uma vez que tais ocorrências afetam o desempenho, a durabilidade e a segurança das construções ao longo de sua vida útil. O estudo destas manifestações permite compreender os mecanismos de degradação dos sistemas e elementos construtivos, relacionando falhas de projeto, execução, materiais utilizados e condições ambientais de exposição. Adicionalmente, a vulnerabilidade de sistemas construtivos em ambientes marinhos reforça a necessidade de investigação.

Fenômenos como a carbonatação e a corrosão por íons cloreto são essenciais para avaliar a durabilidade e o comportamento dos materiais e técnicas construtivas em zonas costeiras. A opção pelo IFMA Campus Alcântara como estudo de caso justifica-se pela diversidade de tipologias construtivas submetidas a um microclima agressivo, marcado por elevada umidade, salinidade e ação dos ventos. Esse contexto permite analisar a interação entre falhas executivas, práticas de manutenção inadequadas e velocidade de deterioração dos elementos estruturais.

Mais que um levantamento pontual, a pesquisa pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento técnico sobre durabilidade de materiais, subsidiando a transição de abordagens corretivas para estratégias preditivas e preventivas de manutenção. A sistematização dos dados possibilitará, ao final, a proposição de diretrizes técnicas para intervenções de recuperação estrutural, buscando garantir a conformidade das edificações com os requisitos de desempenho, vida útil e segurança previstos nas normas técnicas brasileiras.

Dentro desse contexto, este artigo objetiva analisar as manifestações patológicas encontradas nas edificações do IFMA - Campus Alcântara, compreendendo suas causas e implicações, com a finalidade de levantar medidas corretivas e preventivas que possam garantir a conservação do patrimônio, a segurança dos usuários e a continuidade das atividades institucionais.

Assim, inicialmente buscou-se catalogar as principais manifestações patológicas presentes nas edificações do IFMA - Campus Alcântara. Aplicou-se a Matriz GUT como instrumento de apoio à análise, com o objetivo de hierarquizar as manifestações patológicas identificadas, considerando critérios de gravidade, urgência e tendência de agravamento, de modo a subsidiar a definição de prioridades para intervenção. Investigou-se as possíveis causas das manifestações patológicas detectadas, relacionando-as a fatores construtivos, ambientais, de uso e manutenção. E, propôs-se medidas corretivas e preventivas adequadas para cada tipo de manifestação patológica, visando a conservação, durabilidade e segurança das edificações analisadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O QUE SÃO MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS?

As manifestações patológicas podem ser definidas como ocorrências anômalas que se manifestam nas edificações e prejudicam o desempenho dos elementos construtivos, afetando requisitos de segurança, estabilidade e durabilidade ao longo da vida útil da estrutura (Verçoza, 1991). Essas manifestações assumem diversas formas, destacando-se fissuras, trincas, recalques, corrosão de armaduras, desplacamento de revestimentos, infiltrações e processos de deterioração do concreto. Conforme o autor, as ocorrências mais comuns comprometem tanto o aspecto estético quanto a segurança das estruturas.

A eflorescência, por exemplo, aparece como manchas esbranquiçadas em superfícies de paredes e pisos, resultado da migração de sais solúveis por meio da umidade. De acordo com Hillesheim et al. (2016), os principais agentes causadores de patologias relacionam-se ao excesso de carga, variações de umidade e temperatura, ação biológica e incompatibilidade entre materiais. A detecção precoce dessas manifestações, aliada à compreensão dos mecanismos de ocorrência, é essencial para planejar intervenções corretivas eficientes e evitar danos mais severos. Entre as manifestações patológicas mais recorrentes, as fissuras figuram como sinais iniciais de degradação dos sistemas construtivos e, em alguns casos, precedem o surgimento de rachaduras mais acentuadas (Cascudo, 1997). Noal (2016) destaca que o tratamento das fissuras depende da sua origem e classificação técnica.

Fissuras superficiais, como as do tipo "mapeado", geralmente permitem reparos menos invasivos com materiais flexíveis. Em contrapartida, fissuras decorrentes de movimentações estruturais exigem abordagens mais complexas, com estudos específicos e intervenções que solucionem a causa. Helene (1992) ressalta que a corrosão das armaduras é um processo grave, associado à exposição do aço à umidade e oxigênio, levando à perda de seção e à redução da resistência do concreto armado.

Neville (2016) afirma que a degradação do concreto armado pode decorrer de agressões químicas, variações térmicas e ações mecânicas repetidas, manifestando-se por fissuras, desagregações e desplacamentos. O descolamento de rebocos e pisos cerâmicos está, em geral, vinculado à perda de aderência entre placa e substrato ou entre argamassa e emboço. Esse fenômeno ocorre quando as tensões ultrapassam a resistência das ligações, comprometendo o desempenho do sistema construtivo (Ferreira; Lobão, 2018).

A infiltração é uma das manifestações patológicas mais frequentes, com múltiplas origens, incluindo falhas de impermeabilização, trincas ou juntas mal executadas. A umidade persistente favorece outras patologias, como corrosão e eflorescência (Silva; Abdalla, 2024). A infiltração pode ocorrer por penetração externa, absorção dos materiais ou por capilaridade proveniente do solo, frequentemente visível em paredes e pisos (Verçoza, 1991).

A carbonatação é um processo químico que reduz o pH do concreto, tornando-o mais suscetível à corrosão das armaduras. O gás carbônico reage com os compostos do concreto, diminuindo sua alcalinidade e aumentando sua vulnerabilidade (Capraro et al., 2019). O recalque ocorre quando o solo sob a edificação cede, provocando o afundamento parcial da estrutura. Pode ser uniforme ou diferencial; o último costuma gerar trincas e rachaduras, frequentemente originado por falhas no preparo do solo, alterações na umidade ou dimensionamento inadequado das fundações (Menezes, 2017).

2.2. PRINCIPAIS CAUSAS DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS EDIFICAÇÕES

Muitas patologias derivam de inadequações nas fases de concepção do projeto e de execução da obra. Deficiências no dimensionamento estrutural podem submeter elementos a solicitações excessivas, ocasionando deformações indesejadas e, em casos extremos, comprometendo o desempenho e a segurança da construção (Thomaz, 1989).

Para Ferreira e Lobão (2018), as patologias geralmente têm origem em erros ocorridos em alguma fase do ciclo construtivo: planejamento, projeto, fabricação de matérias-primas, execução ou uso, que se manifestam posteriormente como defeitos. Detalhes construtivos mal resolvidos, como juntas de dilatação mal posicionadas, sistemas de

drenagem insuficientes ou ligações mal projetadas, tendem a comprometer a performance das edificações com o tempo. A escolha inadequada de materiais também é determinante, pois a incompatibilidade entre componentes acelera a degradação e reduz a vida útil da estrutura (Cascudo, 1997).

Durante a execução, essas deficiências tornam-se mais críticas quando os materiais não atendem aos padrões de qualidade ou quando a mão de obra não tem qualificação adequada. Erros como dosagens incorretas do concreto, posicionamento inadequado das armaduras e falhas na compactação do solo são comuns em obras sem controle rigoroso, refletindo negativamente na durabilidade das estruturas (Thomaz, 1989).

Adoção de tecnologias e aditivos para melhorar propriedades do concreto pode contribuir para reduzir fissuras e aumentar impermeabilidade, resultando em peças mais resistentes e duráveis (Mehta; Monteiro, 2014). O descumprimento de normas técnicas da ABNT é uma prática que ainda persiste em algumas obras e favorece o surgimento de defeitos prematuros. A falta de controle tecnológico, ausência de ensaios, inspeções e verificações sistemáticas, costuma gerar estruturas com desempenho inferior ao previsto, elevando a probabilidade de manifestações patológicas (Bauer, 2015).

Após a entrega, o ambiente e o uso continuado influenciam a durabilidade. Exposição a sol, chuva, vento e variações térmicas desgastam os materiais. Conforme Heerdt et al. (2016), além de fissuras e mofo, podem surgir bolhas, manchas e descascamentos de pintura, causados por aplicação incorreta da tinta, tempo de secagem inadequado do reboco ou excesso de umidade. Em locais com agentes químicos no solo, água ou ar, o risco de corrosão aumenta significativamente.

A umidade, seja por infiltrações, vazamentos ou ascensão capilar, é uma das causas mais agressivas, favorecendo desde mofo até a corrosão das armaduras. Movimentações do solo resultam em recalques que geram fissuras, rachaduras e deslocamentos. Ferreira e Lobão (2018) indicam o recalque diferencial como uma das principais causas de trincas e rachaduras, sobretudo quando provoca rebaixamento desigual de partes da estrutura, gerando esforços imprevistos e afetando a estabilidade da edificação. Mudanças de uso e aplicação de cargas superiores às previstas podem sobrecarregar elementos estruturais.

A falta de manutenção preventiva e corretiva agrava esse cenário, pois manifestações aparentemente simples podem evoluir para danos extensos e custos elevados de reparação (Cascudo, 1997). Quanto às soluções, Souza e Ripper (1998) enfatizam que cada patologia requer intervenção específica. A seleção dos materiais de reparo exige análise criteriosa de vantagens, limitações, preparo da estrutura, técnicas de aplicação e custos, sendo fundamental optar por métodos que garantam eficiência e durabilidade dos reparos.

2.2.1. POSSÍVEIS CAUSAS DE PATOLOGIAS ESTRUTURAIS EM REGIÕES LITORÂNEAS

Considerando as características construtivas do IFMA Campus Alcântara, podem ser formuladas hipóteses consistentes a respeito das causas mais prováveis das manifestações patológicas observadas nas edificações. A inserção do município em uma região litorânea submete as construções a condições ambientais específicas, marcadas por elevadas temperaturas, alta umidade relativa do ar e pela presença contínua de agentes salinos oriundos da maresia. Esse conjunto de fatores contribui para o agravamento dos processos de deterioração, com destaque para a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, especialmente em situações nas quais há

deficiência no cobrimento do aço, falhas nos sistemas de proteção superficial ou a presença de fissuras que favorecem a penetração de agentes agressivos (Bauer, 2015).

Nesse sentido, a norma ABNT NBR 6118:2014 estabelece que o desempenho em serviço das estruturas está relacionado à sua capacidade de manter condições adequadas de utilização ao longo da vida útil prevista, sem apresentar danos que comprometam, parcial ou totalmente, o uso para o qual foram projetadas (ABNT, 2014). Dessa forma, a ocorrência precoce de patologias indica, muitas vezes, o não atendimento a esses requisitos normativos durante as fases de projeto, execução ou manutenção.

Em edificações públicas, falhas no processo de fiscalização e na seleção dos materiais empregados também contribuem significativamente para o surgimento antecipado de danos. A utilização de concreto com dosagem inadequada, resistência inferior à especificada ou submetido a processos de cura deficientes compromete o desempenho do material. Esse quadro torna-se ainda mais crítico quando as armaduras apresentam cobrimento insuficiente, condição que acelera o avanço da corrosão e reduz a durabilidade da estrutura (Cascudo, 1997).

Outro aspecto relevante diz respeito às características do solo local. A ausência de estudos geotécnicos adequados ou a desconsideração das particularidades do terreno no projeto de fundações, como a presença de solos moles ou suscetíveis a variações de umidade, pode resultar no surgimento de recalques ao longo do tempo. Esses movimentos do solo tendem a provocar fissuras, deslocamentos e deformações nos elementos estruturais, afetando o desempenho global da edificação (Thomaz, 1989).

De acordo com Marinho e Mesquita (2022), a deterioração das edificações ao longo dos anos pode estar associada tanto a fatores naturais, como condições climáticas e movimentações do solo, quanto a falhas construtivas decorrentes de projetos mal elaborados, uso de materiais inadequados, execuções incorretas e ausência de manutenção. Essa combinação de fatores contribui de forma significativa para o surgimento e a evolução das manifestações patológicas.

A manutenção também desempenha papel extremamente importante nesse contexto. Em um campus escolar, caracterizado por uso contínuo e intenso, a ausência de ações rotineiras de manutenção favorece a progressão de danos (ABNT, 2012; Tutikian; Pacheco, 2013).

Por fim, falhas nos sistemas de drenagem, associadas a períodos de chuvas intensas, podem ocasionar o acúmulo de água junto às edificações, facilitando processos de infiltração no solo e nos elementos construtivos (Neville, 2016; Helene, 1992). Esse conjunto de fatores contribui para explicar a recorrência de determinadas patologias observadas nas edificações do IFMA Campus Alcântara.

A tabela 1 apresenta um resumo das principais manifestações patológicas observadas em regiões litorâneas, suas causas prováveis e as medidas corretivas e preventivas associadas:

Tabela 1: Principais patologias estruturais em edificações localizadas em regiões litorâneas: causas prováveis e medidas de mitigação

Manifestação patológica	Causas prováveis	Medidas corretivas e preventivas
Corrosão das armaduras	Exposição contínua a ambientes com elevada umidade e presença de sais provenientes da maresia; insuficiência do cobrimento do concreto; elevada permeabilidade do material	Remoção do concreto deteriorado e tratamento das armaduras; recomposição com materiais adequados; aplicação de sistemas de proteção superficial; adoção de concretos mais densos e com menor absorção
Fissuração em elementos estruturais	Retração do concreto; variações térmicas frequentes; ações mecânicas repetidas; deficiências no detalhamento estrutural	Avaliação da natureza e evolução das fissuras; selagem com materiais compatíveis; reforço estrutural quando necessário; adoção de soluções que minimizem efeitos de retração e dilatação
Desplacamento do concreto	Expansão dos produtos de corrosão da armadura; perda de aderência entre concreto e aço; ciclos sucessivos de umedecimento e secagem	Retirada das áreas comprometidas; tratamento das armaduras expostas; recomposição das seções afetadas; proteção das superfícies contra a penetração de agentes agressivos
Eflorescência	Presença de sais solúveis nos materiais constituintes; transporte de umidade pelos poros do concreto ou da alvenaria; falhas nos sistemas de impermeabilização	Eliminação das fontes de umidade; melhoria das condições de impermeabilização; limpeza controlada das superfícies; escolha adequada de materiais
Infiltrações e umidade excessiva	Deficiências nos sistemas de drenagem; ausência ou degradação de impermeabilização; fissuras e juntas mal vedadas	Readequação dos sistemas de drenagem; recuperação ou implantação de impermeabilização; vedação eficiente de fissuras e juntas construtivas
Carbonatação do concreto	Alta porosidade do concreto; exposição prolongada a ambientes agressivos; cobrimento insuficiente das armaduras	Proteção superficial do concreto; aumento do cobrimento em intervenções corretivas; uso de concretos com maior compacidade
Deterioração por agentes químicos	Contato com água salobra; ataque de sulfatos; ambiente com elevada agressividade química	Substituição dos materiais degradados; utilização de cimentos e concretos mais resistentes; aplicação de revestimentos protetores.

Fonte: Adaptado com base em Helene (1992), Verçoza (1991), Neville (2016), Tutikian e Pacheco (2013) e nas recomendações da ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 5674 (2012).

3. METODOLOGIA

3.1. LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES, REGISTRO FOTOGRÁFICO E PESQUISA DE CAMPO

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem metodológica de caráter descritivo, quantitativo e qualitativo, estruturada com base em revisão bibliográfica e investigação de campo. A pesquisa bibliográfica contemplou publicações técnicas e científicas relacionadas às manifestações patológicas em edificações, abordando seus mecanismos de ocorrência, fatores condicionantes e possíveis estratégias de intervenção, além da consulta às normas técnicas pertinentes ao diagnóstico e à definição de soluções adequadas.

A etapa de campo consistiu na realização de inspeções visuais sistemáticas, acompanhadas de registros fotográficos dos elementos construtivos, os quais subsidiaram a identificação e a classificação das patologias observadas. O desenvolvimento da pesquisa ocorreu de forma gradual, iniciando-se com a definição do

tema e o levantamento teórico, avançando para a elaboração do anteprojeto e a análise dos dados coletados, culminando na interpretação dos resultados e na redação final do trabalho.

Além disso, os dados obtidos foram organizados e sistematizados por meio de quadros e registros descritivos, permitindo a correlação entre as manifestações patológicas identificadas e suas possíveis causas. Essa etapa possibilitou uma análise comparativa entre os referenciais teóricos e a realidade observada em campo, contribuindo para a validação das informações levantadas e para a proposição de recomendações técnicas coerentes com as condições da edificação estudada.

As principais etapas que compuseram esse percurso metodológico estão sintetizadas na Figura 1, a qual ilustra, de forma esquemática, o processo de desenvolvimento adotado nesta pesquisa.

Figura 1: Etapas de desenvolvimento do trabalho

Fonte: Autores (2026), desenvolvido com auxílio de IA.

3.2. CAMPO DE ESTUDO

O Campus Alcântara do Instituto Federal do Maranhão teve sua origem em 2007, quando foi implantado como Núcleo Avançado vinculado ao então CEFET-MA, iniciando efetivamente suas atividades educacionais em 2008, com a oferta de cursos técnicos. A consolidação como campus ocorreu em 2010, marco a partir do qual passou a ampliar sua atuação acadêmica, incluindo a oferta de cursos de nível superior (Instituto Federal do Maranhão, 2015).

Como ocorre em muitas edificações submetidas a uso intenso e prolongado, foram identificadas manifestações patológicas em diferentes estruturas do campus, o que reforça a relevância da análise técnica do estado de conservação dessas edificações. O

conjunto físico é composto por Refeitório, Auditório, sendo constatadas ocorrências patológicas principalmente nos blocos:

- Administrativo, que está dividido em dois pavimentos: térreo e o superior, e que compreende as salas da Administração do campus, Diretorias Geral, de Desenvolvimento Educacional e de Administração e Planejamento, além do Setor Médico, Departamento de Registro e Controle Acadêmico e Coordenadoria de Tecnologia da Informação e Comunicação. As figuras de 2 a 5 representam o Bloco Administrativo:

Figura 2: Bloco Administrativo - Fachada

Fonte: Autores (2025).

Figura 3: Bloco Administrativo - Lateral/ Fundo

Fonte: Autores (2025).

Figura 4: Bloco Administrativo - Lateral/ Entrada

Fonte: Autores (2025).

Figura 5: Bloco Administrativo - Interior/ Escada

Fonte: Autores (2025).

- Educacional, que está dividido em três pavimentos, possuindo cinco salas no pavimento superior, laboratórios, Fabrica de Inovação, além do Departamento de Ensino no pavimento térreo e Biblioteca no pavimento inferior. As figuras de 6 a 9

representam o Bloco Educacional:

Figura 6: Bloco Educacional - Fachada

Fonte: Autores (2025).

Figura 7: Bloco Educacional - Lateral/ Fundo

Fonte: Autores (2025).

Figura 8: Bloco Educacional - Lateral/ Entrada

Fonte: Autores (2025).

Figura 9: Bloco Educacional - Interior/ Escada

Fonte: Autores (2025).

- E na Quadra poliesportiva, que possui em seu interior banheiros masculino e feminino. As figuras de 10 a 13 representam a Quadra Poliesportiva:

Figura 10: Quadra Poliesportiva - Interior/ Telhado

Fonte: Autores (2025).

Figura 11: Quadra Poliesportiva - Parede/ Tabela De Basquete

Fonte: Autores (2025).

Figura 12: Quadra Poliesportiva - Parede/ Trave

Fonte: Autores (2025).

Figura 13: Quadra Poliesportiva - Arquibancada

Fonte: Autores (2025).

3.3. MATRIZ GUT (GRAVIDADE, URGÊNCIA E TENDÊNCIA)

Considerando a diversidade e a ocorrência simultânea de diferentes manifestações patológicas identificadas durante as inspeções visuais e o levantamento de dados em campo, tornou-se necessária a adoção de um método que permitisse organizar e hierarquizar essas ocorrências de forma criteriosa. Em situações como essa, nas quais múltiplos problemas apresentam impactos distintos sobre o desempenho das edificações, a utilização de ferramentas de priorização contribui para tornar a análise mais objetiva e tecnicamente fundamentada (Paladini, 2012).

Nesse contexto, optou-se pela aplicação da Matriz GUT como instrumento de apoio à análise, uma vez que essa metodologia permite avaliar os problemas a partir dos critérios

de Gravidade, Urgência e Tendência. A gravidade está associada às consequências da manifestação patológica sobre a segurança e funcionalidade da edificação, a urgência relaciona-se ao tempo disponível para a intervenção, enquanto a tendência indica a possibilidade de agravamento do problema ao longo do tempo, caso nenhuma ação seja adotada (Campos, 2013).

A escolha da Matriz GUT mostrou-se adequada ao escopo deste trabalho por possibilitar a priorização das manifestações patológicas com base em critérios claros e comparáveis, reduzindo a subjetividade inerente às avaliações puramente qualitativas. Além disso, trata-se de uma ferramenta amplamente empregada em estudos técnicos e gerenciais, sendo facilmente adaptável a diferentes áreas do conhecimento, inclusive à patologia das construções, especialmente em contextos que demandam racionalização de recursos e definição de prioridades de intervenção (Meireles; Santos, 2011).

Cada critério foi avaliado por meio de uma escala ordinal de 1 a 5, na qual valores menores indicam menor impacto ou criticidade, e valores maiores representam situações mais severas. A pontuação final de cada manifestação patológica foi obtida pelo produto dos valores atribuídos aos três parâmetros (G × U × T), permitindo a hierarquização dos problemas conforme o grau de prioridade de intervenção, conforme tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Matriz GUT : Avaliação das manifestações patológicas

Escala usada: 1 (baixo) a 5 (alto) para: G = Gravidade (impacto na segurança/uso) U = Urgência (necessidade de ação imediata) T = Tendência (probabilidade de piorar) Cálculo: GUT = G × U × T.

Fonte: Autores (2026).

3.4. AVALIAÇÃO DOS DADOS E DOCUMENTOS ENCONTRADOS

Foram identificados, ao longo das inspeções, diversos pontos com manifestações patológicas nas edificações analisadas. A avaliação dessas ocorrências foi conduzida com base na análise conjunta dos registros fotográficos, observações de campo e documentação técnica disponível, permitindo a compreensão preliminar do estado de conservação e do desempenho dos elementos construtivos.

Como suporte técnico à análise, adotaram-se os critérios estabelecidos pelas normas NBR 13752:2019, referente à execução de perícias de engenharia, Nbr 15575:2013, que trata do desempenho das edificações habitacionais, e NBR 6118:2014, relativa ao projeto de estruturas de concreto. Essas referências normativas orientaram a interpretação das manifestações observadas, especialmente no que se refere à segurança, durabilidade e funcionalidade das edificações.

A partir dessa avaliação, foi possível correlacionar as patologias identificadas com possíveis causas construtivas, ambientais e de uso, fornecendo subsídios para a etapa subsequente de hierarquização dos problemas e proposição de medidas corretivas e preventivas, conforme os procedimentos metodológicos definidos neste estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

As manifestações patológicas identificadas durante as inspeções de campo foram organizadas de forma sistemática, considerando sua tipologia, localização e características visuais predominantes. As tabelas de 3 a 5 sintetizam o levantamento e a caracterização desses problemas, permitindo uma visão geral do estado de conservação das edificações analisadas. Essa organização possibilita a comparação entre os diferentes tipos de patologias e subsidia as etapas posteriores de avaliação, priorização e proposição de medidas corretivas. Foram encontrados 18 problemas de manifestações patológicas no total conforme tabela 3, que segue abaixo:

Tabela 3 - Manifestações patológicas encontradas

Local	Problemas encontrados	Total
Bloco Administrativo	8	**18**
Bloco Educacional	5	
Quadra Poliesportiva	5	

Legenda:
PA: Problemas do Bloco Administrativo
PE: Problemas do Bloco Ensino
PQ: Problemas da Quadra Poliesportiva

Fonte: Autores (2026).

4.1.1. PROBLEMAS ENCONTRADOS NO BLOCO ADMINISTRATIVO

O afastamento dos blocos cerâmicos, conforme Figura 14, compromete a continuidade do revestimento, podendo permitir infiltrações e afetar a durabilidade da parede, além de prejudicar a estética e a segurança do sistema construtivo. Quanto ao drywall com rachaduras, conforme ilustrado na Figura 15, de uma manifestação patológica associada à movimentação das placas ou execução inadequada. Elas geralmente não comprometem a estrutura, mas afetam a estética. Ambas as manifestações se encontram na sala da CTIC.

Figura 14: PA1 - Afastamento dos blocos cerâmicos

Fonte: Autores (2026).

Figura 15: PA2 - Drywall com rachaduras

Fonte: Autores (2026).

A presença contínua de umidade favorece outras patologias associadas. A infiltração, conforme ilustrado na Figura 16, compromete tanto a durabilidade quanto a salubridade do ambiente, podendo gerar danos indiretos à estrutura. Quanto ao Bolor e Mofo na parede, vide Figura 17, embora não estrutural, afeta a saúde dos usuários e indica falhas de umidade. Ambas se encontram no hall de entrada do Bloco Administrativo.

Figura 16: PA3 - Infiltração na parede

Fonte: Autores (2026).

Figura 17: PA4 - Bolor e mofo na parede

Fonte: Autores (2026).

As fissuras, conforme apresentado na Figura 18, indicam movimentações localizadas do material, que podem afetar apenas o acabamento e a estética, mas não comprometem a estabilidade estrutural da edificação. A gravidade da Rachadura, vide Figura 19, depende da abertura, localização e evolução da rachadura. As duas manifestações foram encontradas no banheiro feminino, pavimento térreo, do Bloco Administrativo, em paredes opostas.

Figura 18: PA5 - Fissuras na parede

Fonte: Autores (2026).

Figura 19: PA6 - Rachadura na parede

Fonte: Autores (2026).

O Recalque Estrutural trata-se de uma patologia estrutural grave, com potencial de evolução contínua e riscos à segurança. Quanto à Eflorescência, há uma Indicativa de umidade, mas com baixo impacto direto na segurança. As duas manifestações foram encontradas no Bloco Administrativo, o recalque na parte externa, do lado de fora, conforme Figura 20 e a Eflorescência na parte interna, no hall de entrada, próximo ao quadro de distribuição de energia, conforme Figura 21.

Figura 20: PA7 - Recalque diferencial

Fonte: Autores (2026).

Figura 21: PA8 - Eflorescência

Fonte: Autores (2026).

4.1.2. PROBLEMAS ENCONTRADOS NO BLOCO EDUCACIONAL

Infiltrações localizadas na parte interior da Biblioteca, próximas às salas de estudo. Este pavimento encontra-se abaixo do térreo do Bloco Educacional. A alta umidade colabora para o aparecimento de manchas como as encontradas na parede, conforme Figuras 22 e 23.

Figura 22: PE1 - Infiltração na parede

Fonte: Autores (2026).

Figura 23: PE2 - Infiltração na parede

Fonte: Autores (2026).

O Desplacamento de pisos cerâmicos, conforme Figura 24, compromete diretamente a segurança e o conforto dos usuários do ambiente. Pisos soltos ou estufados podem

provocar tropeços, quedas e até cortes, além de gerar insegurança para quem circula pelo local. Na entrada do Bloco Educacional, encontra-se mais uma manifestação patológica, conforme Figura 25.

Figura 24: PE3 - Desplacamento de piso cerâmico

Fonte: Autores (2026).

Figura 25: PE4 - Recalque diferencial

Fonte: Autores (2026).

Na Figura 26, o Recalque foi encontrado na Sala - Fábrica de Inovações, pavimento térreo do Bloco Educacional, onde encontra-se um espaço entre o rodapé e o piso.

Figura 26: PE5 - Recalque diferencial

Fonte: Autores (2026).

4.1.3. PROBLEMAS ENCONTRADOS NA QUADRA POLIESPORTIVA

Rachaduras encontradas na quadra, presentes nas figuras 27 e 28, uma com uma subida do canto da porta, subindo num ângulo de 45º e outra subindo do piso ao teto.

Figura 27: PQ1 - Rachadura na parede

Fonte: Autores (2026).

Figura 28: PQ2 - Rachadura na parede

Fonte: Autores (2026).

A exposição do aço acelera processos corrosivos e reduz a vida útil da estrutura. Na figura 29 encontra-se a armadura exposta, na parte inferior da parede da entrada. Sobre a pintura descascando, considerada uma manifestação patológica superficial, é geralmente associada à degradação do revestimento. Nas figuras 30 e 31, encontram-se áreas deterioradas por esta manifestação.

Figura 29: PQ3 - Armadura exposta

Fonte: Autores (2026).

Figura 30: PQ4 - Pintura descascando

Fonte: Autores (2026).

Figura 31: PQ5 - Pintura descascando

Fonte: Autores (2026).

4.2. APLICAÇÃO DA MATRIZ GUT ÀS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICADAS

A Matriz GUT foi aplicada às manifestações patológicas identificadas nas edificações analisadas como ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo a hierarquização das ocorrências segundo critérios de gravidade, urgência e tendência de agravamento. Cada manifestação patológica foi avaliada individualmente, considerando seus impactos sobre a segurança dos usuários, o desempenho da edificação e a possibilidade de progressão ao longo do tempo.

A aplicação da Matriz GUT evidenciou maior criticidade nas patologias de caráter estrutural, como recalques diferenciais, armaduras expostas e desplacamentos, que apresentaram os maiores índices de priorização. Em contrapartida, manifestações predominantemente superficiais ou estéticas, como eflorescência e pintura descascando, obtiveram menores valores, indicando menor urgência de intervenção imediata. Dessa forma, a ferramenta mostrou-se eficaz para organizar as informações obtidas em campo e subsidiar a definição de ações corretivas e preventivas de maneira racional e tecnicamente fundamentada.

A tabela 4, a seguir, apresenta os resultados da aplicação da Matriz GUT às manifestações patológicas identificadas, possibilitando a priorização das intervenções a partir dos critérios de gravidade, urgência e tendência.

Tabela 4 - Aplicação da Matriz GUT no objeto de estudo

MATRIZ GUT	GRAVIDADE	URGÊNCIA	TENDÊNCIA	TOTAL
PA1 - Afastamento dos Blocos Cerâmicos	3	3	3	27
PA2 - Drywall com rachaduras	2	3	3	18
PA3 - Infiltração na Parede	4	4	4	64
PA4 - Bolor e Mofo na parede	2	3	3	18
PA5 - Fissuras na parede	2	2	2	8
PA6 - Rachadura na parede	4	4	4	64
PA7 - Recalque Diferencial	5	5	5	125
PA8 - Eflorescência	2	2	3	12
PE1 - Infiltração na Parede	4	4	4	64
PE2 - Infiltração na Parede	4	4	4	64
PE3 - Desplacamento de Pisos Cerâmicos	4	4	4	64
PE4 - Recalque diferencial	5	5	5	125
PE5 - Recalque Diferencial	5	5	5	125
PQ1 - Rachadura na parede	4	4	4	64
PQ2 - Rachadura na parede	4	4	4	64
PQ3 - Armadura Exposta	5	4	5	100
PQ4 - Pintura descascando	1	1	2	2
PQ5 - Pintura descascando	1	1	2	2

Fonte: Os Autores (2026).

Observações:

- Valores GUT ≥ 64 indicam prioridade elevada de intervenção;
- Patologias estruturais que apresentaram os maiores índices, refletem maior risco à segurança e à durabilidade;
- Manifestações patológicas superficiais que obtiveram baixos valores, caracterizam impacto predominantemente estético.

4.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A MATRIZ GUT

A aplicação da Matriz GUT possibilitou a hierarquização das manifestações patológicas identificadas, considerando seus impactos na segurança, no desempenho e na durabilidade das edificações analisadas. Os resultados evidenciaram que as patologias de

caráter estrutural apresentaram os maiores índices GUT, destacando-se os casos de recalque diferencial e armadura exposta, que concentram elevados valores de gravidade, urgência e tendência de agravamento.

As manifestações associadas à presença contínua de umidade, como infiltrações e desplacamentos, também apresentaram pontuações elevadas. Embora nem sempre comprometam imediatamente a estabilidade estrutural, essas patologias favorecem a progressão de danos secundários, como corrosão das armaduras, perda de aderência dos revestimentos e degradação dos elementos construtivos, o que justifica sua priorização nas ações de intervenção.

Por outro lado, patologias predominantemente superficiais ou estéticas, como eflorescência e pintura descascando, obtiveram menores índices GUT. Esses resultados indicam menor risco imediato à segurança dos usuários, embora sinalizem falhas relacionadas à umidade e à manutenção, que não devem ser negligenciadas a médio e longo prazo.

A análise comparativa entre rachaduras e fissuras demonstrou que, apesar de ambas estarem relacionadas a movimentações da edificação, as rachaduras tendem a apresentar maior pontuação GUT, em função de sua maior abertura e do potencial indicativo de problemas estruturais. Já as fissuras, em geral, mostraram comportamento mais estável, dependendo de sua evolução e localização.

De modo geral, a Matriz GUT mostrou-se uma ferramenta eficaz para apoiar a tomada de decisão, permitindo estabelecer prioridades de intervenção de forma objetiva e fundamentada. Os resultados obtidos reforçam a importância da avaliação integrada entre inspeção de campo, análise técnica e uso de métodos sistemáticos de priorização, contribuindo para o planejamento de ações corretivas e preventivas mais eficientes.

4.4. PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS CORRETIVAS E PREVENTIVAS

Com base na hierarquização das manifestações patológicas obtidas por meio da aplicação da Matriz GUT, foram propostas medidas corretivas e preventivas compatíveis com o grau de criticidade identificado. As intervenções recomendadas priorizam as patologias de maior impacto estrutural e risco à segurança, como recalques diferenciais, armaduras expostas e infiltrações persistentes, por meio de ações de reparo estrutural, recomposição de cobrimento e adequação dos sistemas de drenagem.

Para as manifestações de menor gravidade, predominantemente associadas ao desempenho e à estética, indicam-se medidas preventivas relacionadas à manutenção periódica, controle da umidade e correção de falhas construtivas pontuais. Dessa forma, as soluções propostas buscam não apenas a correção dos danos existentes, mas também a mitigação de recorrências, contribuindo para a durabilidade das edificações e para a gestão mais eficiente da manutenção predial. A Tabela 5 apresenta a atribuição dos valores e a respectiva justificativa técnica para cada patologia analisada.

Tabela 5: Definição das prioridades por manifestação patológica e soluções

Manifestação patológica	Soluções
Recalque Diferencial (PA7, PE4 e PE5) G = 5 → Pode comprometer a estabilidade estrutural. U = 5 → Exige avaliação técnica imediata. T = 5 → Tendência de agravamento progressivo. **Memória de cálculo:** 3 ocorrências (PA7, PE4 e PE5) de 18 encontradas. 18 ->100% 3->x x=300/18=16,67% GUT: 5*5*5=125 => **GUT 125 -> 16,67% do total.**	Avaliação detalhada das fundações e da estrutura, incluindo levantamentos topográficos e inspeções visuais para identificar a evolução das deformações. Quando constatadas irregularidades significativas, torna-se necessário executar intervenções corretivas nas fundações, como reforço ou nivelamento, sempre considerando o controle de cargas e a drenagem do solo para evitar novos recalques. Todo o procedimento deve seguir as recomendações das normas ABNT NBR 6118:2014, NBR 6122:2019 e NBR 15575:2013, assegurando a segurança e a durabilidade da edificação.
Armadura Exposta (PQ3) G = 5 → Compromete diretamente a capacidade resistente do elemento. U = 4 → Necessita intervenção em curto prazo. T = 5 → A corrosão tende a evoluir rapidamente, sobretudo em ambiente agressivo. **Memória de cálculo:** 1 ocorrência (PQ3) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 5*4*5=100 => **GUT 100 -> 5,55% do total.**	A exposição da armadura constitui uma patologia estrutural grave, pois compromete diretamente a capacidade resistente do elemento e tende a evoluir rapidamente, especialmente em ambientes agressivos. A intervenção deve ocorrer em curto prazo, envolvendo a remoção do concreto deteriorado, a limpeza e o tratamento da armadura exposta, seguido da recomposição do cobrimento de concreto, garantindo a proteção do aço contra corrosão futura. Além disso, é importante controlar fatores que aceleram o processo corrosivo, como umidade, infiltrações e presença de agentes químicos agressivos. Todas as medidas devem obedecer às normas ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 15575:2013, assegurando a segurança estrutural e a durabilidade do elemento.
Rachadura na Parede (PA6, PQ1 e PQ2) G = 4 → Pode indicar problema estrutural ou apenas movimentação. U = 4 → Demanda monitoramento e análise técnica. T = 4 → Pode estabilizar ou evoluir, dependendo da causa. **Memória de cálculo:** 3 ocorrências (PA6, PQ1 e PQ2) de 18 encontradas. 18 ->100% 3->x x=300/18=16,67% GUT: 4*4*4=64 => **GUT 64 -> 16,67% do total.**	As rachaduras podem indicar movimentações estruturais ou retrações do material. É necessária avaliação técnica e monitoramento contínuo, aplicando correções pontuais ou intervenções mais abrangentes de acordo com a causa, conforme normas ABNT NBR 15575:2013 e ABNT NBR 6118:2014.
Infiltração na Parede (PA3, PE1 e PE2) G = 4 → Afeta desempenho, salubridade e pode causar danos estruturais indiretos. U = 4 → Requer correção para evitar agravamento. T = 4 → Tendência clara de progressão se não tratada. **Memória de cálculo:** 3 ocorrências (PA3, PE1 e PE2) de 18 encontradas. 18 ->100% 3->x x=300/18=16,67% GUT: 4*4*4=64 => **GUT 64 -> 16,67% do total.**	A solução envolve identificar a origem da umidade, reparar o revestimento e manter a impermeabilização adequada, seguindo os parâmetros da ABNT NBR 15575:2013 e da ABNT NBR 9575:2010.
Desplacamento de Pisos Cerâmicos (PE3) G = 4 → Pode provocar acidentes por desprendimento das peças, oferecendo risco de quedas e cortes aos usuários. U = 4 → Necessita intervenção em curto prazo, devido ao risco iminente. T = 4 → Tendência de ampliação das áreas afetadas, com propagação do descolamento. **Memória de cálculo:** 1 ocorrências (PE3) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 4*4*4=64 => **GUT 64 -> 5,55% do total.**	A intervenção deve ser realizada de forma imediata, com a remoção das peças soltas, limpeza e regularização da base, reaplicação com argamassa adequada e rejuntamento correto, conforme as recomendações da ABNT NBR 13753, ABNT NBR 13755, ABNT NBR 13754 e ABNT NBR 15575:2013.

Tabela 5: Definição das prioridades por manifestação patológica e soluções (Continuação)

Manifestação patológica	Soluções
Afastamento dos Blocos Cerâmicos (PA1) G = 3 → Compromete parcialmente a continuidade do revestimento e pode favorecer infiltrações. U = 3 → Intervenção necessária em médio prazo para evitar agravamento. T = 3 → Tendência de evolução moderada se não tratada, podendo gerar problemas maiores no acabamento e durabilidade da parede.	A correção do assentamento e a verificação das juntas são recomendadas, garantindo a estabilidade e durabilidade do sistema construtivo, conforme orientações da ABNT NBR 15575:2013 e da ABNT NBR 6136:2016.
Memória de cálculo: 1 ocorrências (PA1) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 3*3*3=27 => **GUT 27 -> 5,55% do total.**	A correção do assentamento e a verificação das juntas são recomendadas, garantindo a estabilidade e durabilidade do sistema construtivo, conforme orientações da ABNT NBR 15575:2013 e da ABNT NBR 6136:2016.
Drywall com Rachaduras (PA2) G = 2 → Geralmente não compromete a estrutura. U = 3 → Intervenção pode ser programada. T = 3 → Tendência de estabilização, salvo movimentações contínuas. **Memória de cálculo:** 1 ocorrências (PA2) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 2*3*3=18 => **GUT 18 -> 5,55% do total.**	A intervenção consiste no preenchimento das fissuras e reforço de juntas, prevenindo a expansão futura, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 15575:2013 e da ABNT NBR 15220:2020.
Bolor e Mofo na Parede (PA4) G = 2 → Impacto maior na salubridade do ambiente. U = 3 → Deve ser tratado para garantir condições adequadas de uso. T = 3 → Pode se intensificar com a persistência da umidade. **Memória de cálculo:** 1 ocorrências (PA4) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 2*3*3=18 => **GUT 18 -> 5,55% do total.**	A presença de bolor e mofo impacta a saúde dos ocupantes e a qualidade do ambiente. A solução envolve o controle da umidade, limpeza das superfícies afetadas e aplicação de tratamentos preventivos, em conformidade com a ABNT NBR 15575:2013 e a ABNT NBR 5626:2020.
Eflorescência (PA8) G = 2 → Predominantemente estética. U = 2 → Intervenção não imediata. T = 3 → Pode persistir se a umidade não for eliminada. **Memória de cálculo:** 1 ocorrências (PA8) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 2*2*3=12 => **GUT 12 -> 5,55% do total.**	A eflorescência é um fenômeno estético causado pela migração de sais solúveis na superfície. A solução envolve controle da umidade e reparos superficiais, conforme orientações da ABNT NBR 15575:2013 e da ABNT NBR 12655:2015.
Fissuras na parede (PA5) G = 2 → Impacto moderado na integridade da parede, não comprometendo a estrutura. U = 2 → Intervenção necessária, porém pode ser programada. T = 2 → Tendência de evolução lenta, salvo ocorrência de movimentações contínuas. **Memória de cálculo:** 1 ocorrências (PA5) de 18 encontradas. 18 ->100% 1->x x=100/18=5,55% GUT: 2*2*2=8 => **GUT 8 -> 5,55% do total.**	Recomenda-se monitoramento e reparo pontual do revestimento, com preenchimento das fissuras e pintura adequada, evitando a expansão do problema. Todas as ações devem seguir a ABNT NBR 15575:2013, assegurando durabilidade e condições adequadas de uso do ambiente.

Tabela 5: Definição das prioridades por manifestação patológica e soluções (Continuação)

Manifestação patológica	Soluções
Pintura Descascando (PQ4 e PQ5) G = 1 → Impacto estético. U = 1 → Baixa urgência. T = 2 → Pode se expandir com a ação da umidade. **Memória de cálculo:** 2 ocorrências (PQ4 e PQ5) de 18 encontradas. 18 ->100% 2->x x=200/18=11,11% GUT: 1*1*2=2 => **GUT 2 -> 11,11% do total.**	O descascamento da pintura afeta a estética e apresenta baixa urgência. A correção envolve remover áreas soltas, preparar a superfície e reaplicar o revestimento, seguindo os procedimentos das normas ABNT NBR 15575:2013 e ABNT NBR 15079-1:2019.

Fonte: Os Autores (2026).

A priorização das intervenções foi definida a partir dos valores obtidos pela Matriz GUT, considerando-se exclusivamente a gravidade das manifestações patológicas, independentemente do setor em que ocorrem. As patologias com maiores índices GUT demandam atenção imediata, pois apresentam risco direto à segurança, à estabilidade estrutural e à durabilidade das edificações analisadas.

Entre as manifestações de maior criticidade, destacam-se o recalque diferencial e a armadura exposta, com índice GUT igual a 125 e 100 respectivamente. Estas manifestações patológicas representam risco elevado de comprometimento estrutural progressivo, exigindo avaliação técnica imediata por profissional habilitado, delimitação de áreas de segurança e monitoramento contínuo por meio de instrumentos adequados, como fissurômetros e marcos de controle. No caso da armadura exposta, a urgência se intensifica em razão da possibilidade de corrosão acelerada, com redução da seção resistente do aço e perda de desempenho do elemento estrutural.

Em um segundo nível de prioridade, encontram-se as manifestações com índice GUT igual a 64, como infiltrações persistentes, rachaduras significativas e Desplacamento de Pisos Cerâmicos. Estas manifestações patológicas, embora nem sempre indiquem falha estrutural imediata, apresentam forte tendência de agravamento quando associadas à presença contínua de umidade. Além disso, o desplacamento de pisos cerâmicos pode gerar risco aos usuários, exigindo ações corretivas em curto prazo, incluindo a identificação da origem da infiltração, correção de falhas de impermeabilização ou drenagem e contenções provisórias quando necessário.

As manifestações com índice GUT intermediário, como afastamento dos Blocos Cerâmicos (GUT 27), Rachaduras em drywall (GUT 18) e Bolor e mofo (GUT 18), estão associadas principalmente a problemas de salubridade e conforto ambiental, embora também indiquem falhas construtivas relacionadas à umidade. Nesses casos, as intervenções devem priorizar a eliminação da fonte de umidade, seguida de medidas de ventilação, limpeza e recuperação das superfícies afetadas, de modo a restabelecer condições adequadas de uso.

Por fim, as manifestações patológicas classificadas com menor prioridade, como eflorescência e pintura descascando, apresentam caráter predominantemente superficial ou estético, com baixos índices GUT. Essas manifestações tendem a ser consequências de problemas mais relevantes, especialmente infiltrações e movimentações estruturais, e

devem ser tratadas após a resolução das causas primárias, integrando etapas posteriores de manutenção corretiva e preventiva.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu identificar e analisar, de forma sistematizada, as principais manifestações patológicas presentes nas edificações do IFMA de Alcântara, evidenciando a ocorrência de danos tanto de natureza estrutural quanto não estrutural. A investigação de campo, aliada ao suporte das normas técnicas e da literatura especializada, possibilitou compreender as causas mais prováveis dessas patologias, bem como suas implicações para a segurança, durabilidade e desempenho das construções.

A aplicação da Matriz GUT mostrou-se uma ferramenta eficaz para a hierarquização das manifestações patológicas, ao permitir a priorização das intervenções com base em critérios objetivos de gravidade, urgência e tendência de agravamento. Os resultados obtidos indicaram que patologias associadas ao recalque diferencial, armadura exposta, infiltrações persistentes e desplacamentos apresentaram os maiores índices GUT, demandando ações imediatas por representarem riscos diretos à estabilidade estrutural e à integridade dos usuários.

Por outro lado, manifestações de caráter predominantemente superficial, como eflorescência, pintura descascando e fissuras em elementos de vedação leve, embora menos críticas do ponto de vista estrutural, não devem ser negligenciadas, uma vez que podem atuar como indicativos de problemas mais profundos, especialmente relacionados à presença de umidade e falhas construtivas ou de manutenção.

Dessa forma, o estudo reforça a importância da adoção de estratégias de manutenção preventiva e de monitoramento contínuo das edificações, sobretudo em ambientes sujeitos a condições ambientais agressivas. Além disso, evidencia-se que o uso de ferramentas de apoio à decisão, como a Matriz GUT, contribui significativamente para uma gestão mais racional das intervenções, auxiliando na definição de prioridades técnicas e no planejamento de ações corretivas e preventivas mais eficientes.

Por fim, espera-se que os resultados apresentados possam servir como referência para trabalhos futuros e para estudos semelhantes em edificações com características e contextos construtivos equivalentes, ampliando o debate técnico sobre patologia das construções e gestão da manutenção predial.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626:2020. Instalações prediais de água fria - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674:2012. Manutenção de edificações - Requisitos para o sistema de gestão de manutenção.** Rio de Janeiro, 2012.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:2019. Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136:2016. Blocos de concreto para alvenaria - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575:2010. Impermeabilização -**

Sistemas para proteção de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2015. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13752:2019. Perícias de engenharia - Execução de perícias na construção civil.** Rio de Janeiro, 2019.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13753:2016. Revestimento de paredes e pisos internos com placas cerâmicas e argamassa colante - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15079-1:2019. Tintas para construção civil - Especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais - Parte 1: Tinta látex nas cores claras.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:2020**. Desempenho térmico de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:2013. Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

[13] BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

[14] CAMPOS, Vicente Falconi. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia**. 9. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2013.

[15] CAPRARO, Ana Paula Brandão; PAULA, Poline Ariana Alves de; SILVA, Rafael Fernandes da; RÉUS, Giovana Costa; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Estudo da previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado: iniciação da corrosão por carbonatação.** Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 6, n. 2, 2019. Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3147//> Acesso em: 06 jun. 2025.

[16] CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo, PINI; Goiânia, EDITORA UFG; 1997.

[17] FERREIRA, J. B., & LOBÃO, V. W. N. (2018). **MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, 5(1), 71. Recuperado de https://periodicosgrupotiradentes.emnuvens.com.br/cadernoexatas/article/view/5853. Acesso em: 6 jun. 2025.

[18] GARCIA, Jean R.; ALBUQUERQUE, Paulo J. R. **Patologia das construções.** Rio de Janeiro: LTC, 2019.

[19] HEERDT, Giordano Bruno; PIO, Vanessa Mafra; BLEICHVEL, Natália Cristina Thiem. **Principais patologias na construção civil. 2016.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade Metropolitana de Rio do Sul – UNIASSELVI/FAMESUL, Rio do Sul, 2016. Disponível em: <https://www.webartigos.com/storage/app/uploads/public/588/508/2f9/5885082f9dffe889875467.pdf//> Acesso em: 10 out. 2025.

[20] HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: PINI, 1992.

[21] HELENE. Paulo Roberto do Lago. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo, Pini, 2003.

[22] HILLESHEIM, C., Soares, L. A., Veiga, M. C., & Floriani, R. (2016). **PATOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: estudo de caso para a Entidade Beneficente**. Maiêutica - Engenharias, 2(1). Disponivel em:<https://revistas.uniasselvi.com.br/index.php/ENG_EaD/article/view/1528/665//> Acesso em: 15 nov. 2025.

[23] INSTITUTO FEDERAL DO MARANHÃO – CAMPUS ALCÂNTARA. **Sobre o campus.** Alcântara: IFMA, 30/04/2015. Disponível em: https://alcantara.ifma.edu.br/sobreocampus/. Acesso em: 15 jun. 2025.

[24] MARINHO, Jefferson Luiz Alves; MESQUITA, Esequiel Fernandes Teixeira (orgs.). **Patologia das Edificações: manifestações nas edificações e no patrimônio histórico.** 2. ed. São Paulo: Leud, 2022.

[25] MEIRELES, Manuel; SANTOS, Edilene Ferreira dos. **Ferramentas administrativas para identificação, observação e análise de problemas.** São Paulo: Atlas, 2011.

[26] MENEZES, Ricardo de**. Fundações e recalque diferencial: análise e soluções.** Rio de Janeiro: LTC, 2017.

[27] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

[28] NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

[29] NOAL, Bruno Alexandre Mainardi. **Entendendo as trincas e fissuras. Mapa da Obra**, 13 jul. 2016. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/entendendo-as-trincas-e-fissuras//>. Acesso em: 2 jun. 2025.

[30] PALADINI, Edson Pacheco. **Gestão da qualidade: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

[31] SILVA, M. C. do N. C. da, & ABDALLA, A. M. W. (2024). **Ação da umidade em edificações - métodos de prevenção e recuperação**. Revista Tecnológica Da FATEC, 15(1). Disponível em: < https://doi.org/10.62790/rtfv15n1-012//>. Acesso em: 2 dez. 2025.

[32] SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

[33] THOMAZ, Ercio. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação.** São Paulo: Pini, 2019.

[34] TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; PACHECO, Jefferson Brum. **Patologia das construções: uma abordagem preventiva**. Porto Alegre: ANTAC, 2013.

[35] VERÇOZA, Ênio Pazini**. Patologia das edificações.** Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1991.

Capítulo 2

Argamassa com adição de polímeros reciclados

Wagner Roberto Santos dos Santos
Renan Antunes Costa
Miguel Rodrigues Paschoal
Jefferson Dias Gonçalves
Jesse Luis Padilha

Resumo: Este trabalho mostra a viabilidade do uso de polímeros reciclado para fabricação de argamassa, se apresenta como uma forma de reutilizar material plástico descartados em áreas de lixão. Procurando a possibilidade de utilizar uma propriedade dos polímeros, de serem bons impermeabilizantes. Logo com essa característica do material reciclado, procura-se definir quanto se deve adicionar a composição (areia, cimento e polímero), sendo definida a partir de análise de analise fatorialcom o objetivo de obter o gral de significância, ou seja, se adicionar mais polímero e cimento essa ação poderá aumentar ou diminuir a absorção de água.Agregando valor a argamassa com adição de polímero, tanto no critério de respeito ao meio ambiente onde se reutiliza material descartado e estudo de novas tecnologias com a sua utilização melhorada com adição de um impermeabilizante reciclado. Que comercialmente é um ponto crítico e de alto valor agregado nas argamassas.

Palavras-chave: Polímeros, Argamassa, reciclagem, analise fatorial, impermeabilizante.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente a literatura especializada tem trazido diversos estudos, principalmente de pesquisadores estrangeiros, sobre concreto usando PET (polietileno tereftalato) reciclado como agregado. Para John (2000), além de ser uma opção em relação às demais, a reciclagem de resíduos apresenta várias vantagens. Dentre as vantagens do uso desse tipo de material está o fato de as fibras de PET reciclado serem facilmente misturadas no concreto e conferem novas propriedades ao material (Ochi, 2007). Outro ponto positivo foi a redução de resíduos sólidos nos aterros sanitários segundo (Siddique et al., 2008). O material PET apresenta boa resistência à tração e impacto, resistência química, processabilidade e razoável capacidade de estabilidade térmica.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O "Estudo da viabilidade do uso de polímeros reciclado para fabricação de argamassa" foi idealizado para buscar uma maneira de reduzir os problemas ambientais proporcionados pela quantidade de polímeros descartadosem grande número no meio ambiente. A escolha da argamassa se deu pelo fato do mesmo ainda ser pouco pesquisado com relação à adição de material reciclado. Portanto essa pesquisa tem seu caráter de ineditismo, o que é essencial quando se procura uma inovação tecnológica.

Galvão (2010) afirma que a adição de materiais poliméricos reciclados a argamassa corresponde a uma nova perspectiva nas atividades de pesquisa, integrando as áreas de tecnologia e meio ambiente. Em uma recente pesquisa internacional realizada pela Civil EngineeringForum for Innovation (CEFI) revelou que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor de construção civil (John, 2015). Além disso, segundo o autor, a reciclagem poderá resultar em ganho econômico e na possibilidade de desenvolvimento de um produto com características que permitam ampliar o leque de uso na construção civil, inclusive na produção de componentes de menor custo para utilização em obras de interesse social, como é o caso da argamassa com polímeros reciclados proposto nesse projeto.

Devido à relação custo benefício favorável, os plásticos foram ganhando mercado e hoje os encontramos em diversos produtos, desde o copo descartável até dentro dos motores de automóveis. O acúmulo deste material de difícil decomposição – borrachas e plásticos ficam no ambiente por muito tempo – tornou-se um grave problema.

Logo usar um material descartado, como no caso de polímeros e utiliza-los na composição de argamassa, procurando adequar a um traço ideal, neste caso, o aditivo não substitui o cimento no traço, ou seja, é um compósito formado por dois aglomerantes, o cimento Portland e o polímero. De acordo com Tonet (2009), que apresenta um processo de produção que consiste na adição de um polímero, disperso em água, à mistura da na argamassa no seu estado fresco. Sendo assim, no processo de hidratação e cura do cimento, ocorre a formação do filme polimérico.

Onde além da formação do filme polimérico as resinas poliéster, epóxi, vinílicas, fenólicas e o metilmetacrilato, derivadas do petróleo, são utilizadas como aglomerante, apresentam boa resistência química, especialmente aos meios ácidos e adquirindo características flexíveis, algo que a argamassa convencional ou com aditivos não possui.

As vantagens são inúmeras, todavia este material precisa de cuidados na sua confecção, devendo ser consideradas várias variáveis como por exemplo, a sua cura rápida,

justificando a sua aplicação na recuperação de pisos industriais, local onde necessita-se rápida liberação. Sendo assim, é essencial que seja produzida por profissionais competentes.

O emprego desta argamassa no Brasil ainda é limitado porque a maioria das misturas empregadas são importadas e há poucas pesquisas sobre o material, além de não haver normas técnicas direcionadas para a produção e caracterização de argamassa modificado com polímero (Ribeiro, 2007).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Um dos problemas mais comuns, para quem faz experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse (Neto, Scarminio e Bruns, 2003). Antes de se realizar estudos experimentais, envolvendo processos de misturas, é sempre bom realizar um planejamento fatorial. Essa técnica é muito utilizada quando se procura entender qual é a influência de fatores (variáveis que o experimentador tem condições de controlar) sobre uma determinada resposta (variável de saída, que pode ser ou não dependente dos fatores). Para isso, são realizados experimentos com os fatores estando em diferentes níveis (condições de operação). Também se procura identificar os possíveis efeitos de interação entre os fatores. O tipo mais comum de planejamento fatorial é o que envolve dois fatores e dois níveis, ou seja, 22. Nesse estudo, os fatores escolhidos foram a quantidade de cimento e a quantidade de polímero. A variável resposta foi o poder de absorção de água. Em um planejamento fatorial completo 22, o número mínimo de experimentos a ser realizado deve ser igual ao número de fatores vezes o número de níveis, nesse caso, será 2 vezes 2 = 4, que é o número de todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Todavia, esse número aumenta quando se realizam experimento com repetições. Nesse trabalho, optou-se por se realizar os experimentos em duplicata, realizando-se repetições autênticas e em ordem aleatória. Consequentemente o número total de testes foi 8. Os ensaios repetidos permitiram estimar o erro experimental, o qual permite avaliar a significância estatística dos efeitos, tanto os individuais como o de interação.

De acordo com Brereton (2007), o planejamento experimental consiste em seis etapas. A primeira delas envolve a escolha dos níveis alto e baixo para cada fator. Para o cimento, o nível baixo foi a quantidade de 100g e o nível alto 200g. Já para o polímero, o nível baixo foi 60g e o nível alto 290g. O próximo passo, é a codificação dos fatores em "-" (nível baixo) e "+" (nível alto), conforme visualizado na tabela 4. No terceiro passo ocorre a execução dos testes. As três últimas etapas envolvem, nessa ordem, a análise dos dados, principalmente as respostas, o cálculo dos efeitos e a interpretação desses efeitos. Os efeitos considerados significantes do ponto-de-vista estatístico são considerados aqueles cujo valor absoluto for superior a t4 x s(efeito), onde t4 representa com 4 graus de liberdade a variável da distribuição t ou distribuição de Student e s(efeito) é o erro padrão de um efeito. Utilizou-se um nível de confiança de 95%.

Tabela 1. Codificação dos fatores de acordo com o nível no planejamento fatorial

	Nível	
Fator	(-)	(+)
Cimento (g)	100	200
Polímero (g)	60	290

O estudo continuou através de pesquisas bibliográficas e ensaios mecânicos, com o intuito de identificar as características, no que tange a tecnologia de argamassa contendo polímeros. Sabe-se que a porosidade é uma característica comum no seu estado endurecido, que afeta não apenas propriedades mecânicas, tais como resistência e módulo de deformação, mas também a permeabilidade e durabilidade. Entende-se que resistência e durabilidade estão intimamente associadas à sua porosidade. Contudo, se esses poros forem preenchidos, parcial ou totalmente, com polímero, a área de apoio da carga efetiva, à qual o material é submetido, é ampliada, o que vem beneficiar o incremento de sua resistência mecânica, bem como dificultar a penetração de agentes agressivos, colaborando desse modo para o aumento de sua durabilidade.

Para o processo de seleção da composição granulométrica de agregados, tomou-se como base a norma Nbr 7217/87 NM 248. Já para os ensaios de controle da resistência à compressão e absorção de água, a norma de referência Nbr 5739/2007.

Em seguida foi realizado o contato com a cooperativa de catadores de material reciclado de Tucuruí -PA, a mesma que disponibilizou a matéria-prima para o estudo.

Para a realização dos ensaios, foram moldados 48 corpos-de-prova, com valores de traço referentes a areia, cimento e polímeros definidos segundo a proporção (211; 121;112) respectivamente em 5 mesh e variando os outros componentes em intervalos de 100g afim de se estabelecer um valor de referência e uma linearidade dos compósitos.

Depois de desmoldados os corpos de prova, tanto do traço A, B, C e D estes foram submetidos ao ensaio de teor de humidade, onde os mesmos foram pesados logo a pós o desmolde e colocados em um balde com água durante 2 horas e pesados novamente obtendo assim os respectivos valores de umidade.

2.1. MATERIAIS UTILIZADO E EQUIPAMENTOS QUADRO 1

Quadro 1: equipamentos e materiais

Matéria-prima	Equipamentos
Polímero triturado	Balança digital
Seixo, areia, cimento	Agitador de peneiras
Óleo vegetal	Soquetes
Água	Máquina de ensaio de compressão
	Bandeja e metal (5x10) cm

Preparo dos traços de massa

Os traços se diferem quanto a sua quantidade de areia, cimento e polímero triturado. Para observar as características mecânicas quando a variação de alguns componentes do traço em relação a sua composição ficando a composição de acordo com a tabela1.

Tabela 1: composição dos traços

Traço	Areia	Cimento	Polímero	Água
A	100g	100g	290g	200ml
B	200g	100g	60g	200ml
C	100g	200g	60g	200ml

Nas figuras 1 e 2 a seguir são mostrados materiais, equipamentos e processos envolvidos na parte experimental do projeto:

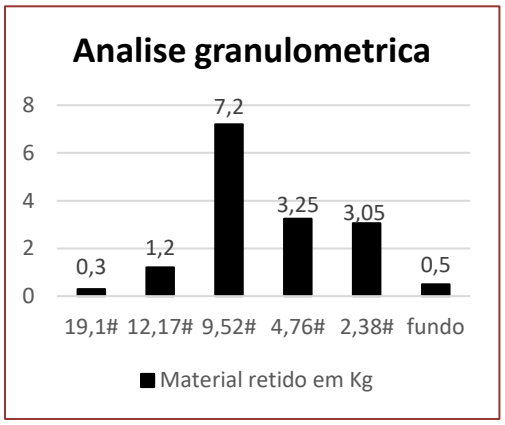
Figura 1. Peneira utilizada na classificação do tamanho dos polímeros

Figura 2. Pesagem do Polímeroe Homogeneizando areia, cimento e polímero

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ensaio granulométrico, foi possível observar os teores de material retido em diferentes tipos de malhas (Figura 4). O maior teor de material ocorreu na malha de 9.52 Mesh, com uma quantidade de 7.200 kg, e a menor quantidade na malha de 19.1 Mesh, com 500 kg. Mais a finalidade do ensaio de granulometria para o uso dos polímeros, se destaca por apresentar o tamanho e quantidade real de material retido por malha, onde no teste realizado, apresenta duas informações importantes, ou seja, a primeira delas se refere a quantidade de material retido na malha de 9,52# com 7,2kg, um quantitativo ideal para se trabalhar caso o objetivo fosse adicionar o material reciclado a concreto, pelo simples fato do agregado graúdo ser maior que 5# , mais o foco do trabalho está na produção de argamassa que precisa de um agregado miúdo menor que 5#, com isso se utilizou para os testes o material retido na malha de 4,76# , mesmo com uma quantidade de apenas 3,25kg retido na malha. Por que essa preocupação com a quantidade retida, simplesmente com o objetivo de aproveitar ao máximo o material reciclado dentro dos padrões de segurança e qualidade estabelecidos nas normas utilizadas no estudo.

Figura 3. Material plástico retido (valor em Kg)



O teor de umidade do traço "A ,B"(valores da Tabela 2),apresenta uma capacidade de absorção de água 10% a mais que os traços "C,D" logo esse ensaio se destaca por corrigir a água de amassamento do concreto e informar a relação água /cimento. Nesse trabalho essa relação está de 0,9.

Tabela 2: Teor de umidade

Corpo de prova	Peso seco	Peso úmido	% absorvido
Nº 1 A	253,2g	264,5	10,82
Nº 2 B	232,8g	243,7	10,68
N° 3 C	282,1g	301,4	18,53
Nº 4 D	262,3g	292,8	27,32

Após definir o padrão ideal de granulometria do polímero a ser usado, o traço ideal para resistência a compressão "C" e teor de umidade"A" e "B", logo por apresentar um menor teor de absorção de água recomenda-se a utilizar o traço B. Além disso é sugerido que durante o processo de mistura dos materiais, deve-se adicionar água aos poucosmais com uma quantidade total de 200 ml, até a massa ganhar consistência de liga.

Para validar e orientar os resultados dos ensaios, os dados obtidos em testes de humidade passaram por um tratamento estatístico denominado planejamento fatorial de experimentos, obtendo como resposta uma faixa ideal de adição de cimento e polímeros para absorver uma menor quantidade de água.

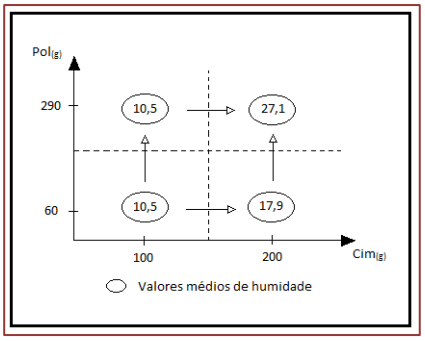
De acordo com a tabela x, quando usamos 100g de cimento e elevamos a quantidade de polímero de 60g para 290g (ensaios 1 e 2), a quantidade de água absorvida não sofre alteração, ou seja, permanence em 10,5. No entanto, quando usamos 200g de cimento, a mudança de níveis relacionada à quantidade de polímeros acarreta uma mudança de 17,9 (ensaio 3) para 27,1 (ensaio 4) no teor de umidade. Portanto, o efeito da quantidade de polímeros sobre a absorção de umidade na argamassa depende em que nível a quantidade de cimento está. Quando se analisa o efeito da quantidade de cimento, percebe-se que quando se usa 60g de polímeros, a mudança da quantidade de cimento de 100g para 200g causa uma mudança na quantidade de umidade de 10,5 (ensaio 1) para 17,9 (ensaio 3), respectivamente. Porém, se usarmos 290g de polímeros, essa mesma mudança de níveis na quantidade de cimento causa um aumento no teor de umidade de 10,5 (ensaio 2) para

27,1 (ensaio 4). Outra forma de visualizeras mudanças ocorridas nos ensaios é por meio do diagrama da figura x. Este diagrama mostra os valores do teor de umidade, localizado nos vertices do quadrado. O sentido das setas indica o sentido da mudança de nível em um dos fatores, enquanto o outro fator permanence inalterado. Então existe uma tendência de que composições de argamassa com menores quantidade de cimento e de polímeros absorvem menos umidade segundo a Tabela 3. Resultados dos ensaios de absorção de água do planejamento factorial 22.

Tabela 3 . Porcentagem de absorção de água

Ensaio	Cimento	Polímero	Respostaa		Média
1	-	-	10,68	10,23	10,5
2	-	+	10,82	10,23	10,5
3	+	-	18,53	17,3	17,9
4	+	+	27,32	26,8	27,1

Figura 4. Interpretação geométrica dos efeitos do planejamento fatorial 22



Os efeitos calculados para o planejamento 22 são mostrados na tabela 4. Para o cimento, o efeito foi 12, enquanto para o polímero foi 4,6. O efeito de interação entre esses dois fatores foi 4,6. O teste de significância mostrou que todos os três efeitos são relevantes e, portanto, dignos de interpretação, pois eles são em valor absoluto superiores a t4 x s(efeito), 3,4854 x 0,42 = 1,47. Assim quando o efeito de uma variável depende do nível de outra, diz-se que as duas variáveis interagem. Se não houvesse interação, o efeito do cimento sobre a absorção de umidade deveria ser o mesmo independentemente da quantidade de polímero ser 60g ou 290g. Do mesmo modo, diríamos para o efeito do polímero, isto é, a sua influência na absorção de água não dependeria da quantidade de cimento. Todavia, os resultados revelam haver sim interação entre ambos os fatores. Portanto, o cimento e o polímero são variáveis importantes na produção da argamassa considerando a influência que exercem na impermeabilização do composto.

Tabela 4. Resultados dos efeitos do planejamento fatorial 22

Efeito do material	Avaliação	Resultado
Cimento =12	12 > 1,47	É significativo
Polímero = 4,6	4,6 > 1,47	É significativo
Cimento x polímero = 9,6	9,6 > 1,47	É significativo

4. CONCLUSÃO

O estudo da utilização de polímeros reciclados, na composição de argamassa. Obteve resultados satisfatórios em quanto a teor na forma de traço ideal, a fim de obter um valor de absorção de água em torno de 10%. Essa composição está em torno de 60g de polímero para 100g de cimento. O planejamento factorial revelou que os efeitos relacionados à quantidade de cimento, à quantidade de polímeros e à interação entre o cimento e o polímero são significativos. Dessa maneira, pode-se concluir que o cimento e o polímero são variáveis importantes na produção da argamassa considerando a influência que exercem na impermeabilização do composto e composições de argamassa com menores quantidade de cimento e de polímeros absorvem menos umidade.

REFERÊNCIAS

[1] Tonet, K. G. COMBUSTIBILIDADE FRENTE À ADIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2009.

[2] Ribeiro, R. Concreto modificado com polímero. 2007. Disponível em: http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-modificado-com-polimero/. Acesso em: 26 jan. 2016.

[3] GALVÂO, José Carlos Alves. Uso de materiais poliméricos reciclados em estruturas de concreto para superfícies hidráulicas. 2010. 148f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE - Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

[4] JOHN, Vanderley M. A construção, o meio ambiente e a reciclagem. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm. Acesso em: 01 de fevereiro de 2016.

[5] JOHN, Vanderley M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

[6] OCHI, T; OKUBO, S.; FUKUI, K. Developmentofrecycled PET fiberand its application as concrete-reinforcingfiber. Cement& Concrete Composites. v. 29, p. 448-455, 2007.

[7] SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. Use ofrecycledplastic in concrete: A review. Waste Management. v. 28, p. 1835 -1852, 2008.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Informação e documentação – Citações em documentos – apresentação: NBR 10.004 – Resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2002a.

[9] BRERETON, Richard. Applied chemometrics for scientists. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

[10] NETO, Benício de Barros, SCARMINIO, IedaSpacino e BRUNS, Roy Edward. Como fazerexperimentos: pesquisa e desenvolvimentonaciência e naindústria, 2 ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003. 4001p.

Capítulo 3

Substituição de madeira de alta durabilidade por polímero reciclado em batentes: uma abordagem experimental e aplicada

Fernando Gonçalves
Viviane Teleginski Mazur
Maurício Marlon Mazur
Marcelo Henrique Granza
Anderson Amaro Turri
Nikelan Rox
Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

Resumo: Os batentes de porta tipo exportação de uma empresa do interior do Paraná são confeccionados utilizando em sua base uma madeira nobre importada, o cipreste amarelo do Alasca. Esta madeira possui elevada resistência à deterioração, o que contribui para aumentar a vida útil do produto, pois a exposição à umidade é um dos principais agentes de degradação das molduras. Entretanto, para reduzir os custos de fabricação, a tecnologia *finger joint* é utilizada para unir a base ao restante da esquadria de Pinus taeda. Este trabalho investigou materiais nacionais alternativos para substituição da base inferior do batente de porta, com a finalidade de reduzir custos produtivos, mas ao mesmo tempo, garantir um desempenho equivalente enquanto se respeitam normas internacionais que limitam ou até proíbem o uso de tratamentos químicos. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de absorção de umidade, crescimento fúngico, módulo de elasticidade (MOE), condutividade térmica e flexão. Foram comparados os resultados para *Pinus taeda* de alta e baixa densidade, cipreste amarelo do Alasca, compósitos madeira-plástico (WPC) provenientes de materiais reciclados com diferentes tipos de reforço lignocelulósico e também a matriz polimérica reciclada sem reforço. Os resultados indicaram que o *Pinus taeda* de alta densidade não apresentou desempenho superior ao de baixa densidade em relação à absorção de umidade e resistência ao crescimento fúngico. Entre os WPCs, o reforçado com pellet apresentou maior suscetibilidade biológica, enquanto os com maravalha e a matriz polimérica reciclada não apresentaram colônias perceptíveis após 30 dias. A partir do resultado de desempenho superior e facilidade de fabricação, ensaios de flexão foram realizados em juntas *finger joint* entre a matriz e o *Pinus taeda*, para comparar o desempenho com as especificações do produto moldura de porta. Os resultados dos ensaios mecânicos, quando as juntas entre *Pinus taeda* e o polímero reciclado são adesivadas de forma homogênea, a resistência é equivalente às juntas com cipreste do Alasca, indicando a viabilidade técnica da substituição do cipreste por polímero reciclado na aplicação estudada.

Palavras-Chave: Compósito madeira plástico, Madeira serrada, Decaimento fúngico, *Finger joint,* Resistência à flexão.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural obtido de florestas manejadas (natural) ou cultivada (reflorestamento), amplamente empregada em estruturas para construção civil. Estruturas de concreto e aço demandam maior energia incorporada e operacional em comparação com estruturas de madeira (Bahramian e Yetilmezsoy, 2020). O consumo global de madeira está sendo impulsionado e deverá atingir em 2030 mais de 2 bilhões de metros cúbicos (Lock et al., 2021), pois há uma recente tendência dos países do hemisfério Norte (que já tem a madeira como principal material de construção) em utilizar estruturas total ou parcialmente com madeira (Bahramian e Yetilmezsoy, 2020; Voulpiotis et al., 2021; Svatoš-Ražnjević et al., 2022). Isso porque o sequestro de carbono e demais benefícios provenientes do manejo e reflorestamento de florestas, tais como melhora da qualidade da água e recuperação de solo, se destacam mediante o combate às mudanças climáticas (Li et al., 2025).

O processamento da madeira gera resíduos em formas diversas como o pó, cavacos, fibras entre outras (Ashori e Nourbakhsh, 2009). A incorporação desses resíduos de madeira em uma matriz polimérica, chamado de compósito de madeira plástico (WPC, do inglês Wood Plastic Composite), tem sido estudada desde a década de 1980 (Jones e Brischke, 2017). Entretanto, bases de dados como Scopus e Web of Science apresentam um aumento expressivo no número de pesquisas e publicações científicas sobre o tema desde 2003. Esse crescimento pode ser atribuído a diversos fatores convergentes, como a crescente demanda por materiais sustentáveis e com menor impacto ambiental, o qual estimulou o desenvolvimento de alternativas que utilizam resíduos lignocelulósicos e plásticos recicláveis, característica central dos WPCs. Paralelamente, os avanços nas tecnologias de processamento, como extrusão e moldagem, permitiram melhorias significativas no desempenho mecânico e na durabilidade desses materiais, viabilizando sua aplicação em escala industrial. O setor da construção civil passou a incorporar os WPCs em aplicações externas como decks (Bolin e Smith, 2011) cercas, mobiliário e coberturas (Toghyani, Matthews e Varis, 2020), o que aumentou a demanda por estudos que avaliassem suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais. A disponibilidade crescente de matéria-prima reciclável e o fortalecimento das redes de pesquisa internacionais contribuíram para consolidar o WPC como um campo promissor de investigação científica e tecnológica. Portanto, a reciclagem eficiente de plásticos e resíduos de madeira desempenha um papel crucial na promoção do desenvolvimento sustentável e na conservação ambiental.

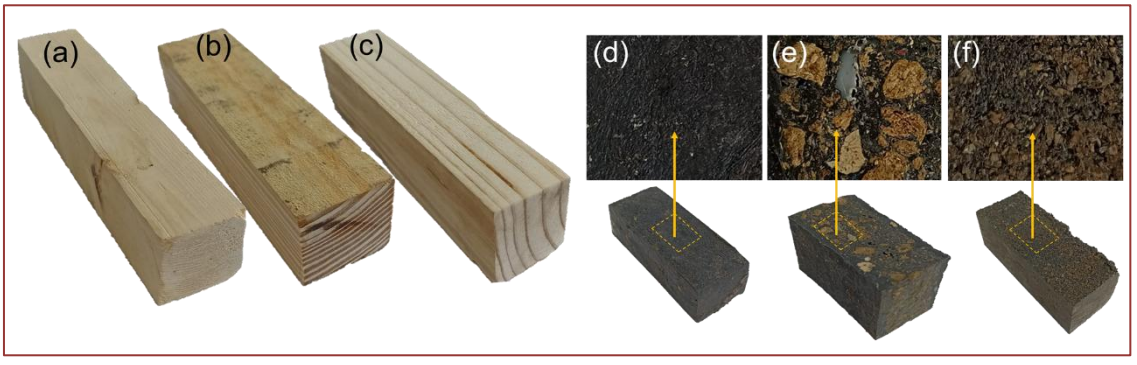
Quando colocados em ambientes externos contendo umidade, radiação ultravioleta e outras intempéries, as madeiras maciças e até certo grau, também os WPCs ficam suscetíveis a danos estruturais e dimensionais, além de ataque biológico como fungos. Tais fatores são importantes para se definir a durabilidade desses materiais e a partir desse conhecimento proporcionar a correta seleção e dimensionamento de produtos e estruturas. Variando-se as espécies de madeira ou o método de produção dos WPCs, com diferentes tipos de plásticos e/ou resíduos de madeira incorporados, a resposta às intempéries e ataques biológicos varia muito. Considerando que os WPCs apresentam boa resistência à umidade, à fluência e estabilidade dimensional (Zhou et al., 2022), conhecer e comparar suas propriedades com as madeiras maciças é crucial para que novas possibilidades de aplicações sejam obtidas, seja na substituição total ou parcial de partes de produtos que ficam expostas ao ambiente externo. O aumento do tempo de vida útil com implicação na redução potencial das manutenções e das substituições previstas impacta de forma positiva nas questões ambientais e de segurança.

Neste trabalho, corpos de prova de madeira maciça de duas variedades de pinus e dois tipos de WPCs com diferentes tipos de reforços, além da matriz polimérica, foram submetidos diferentes ensaios, visando compreender a correlação entre a morfologia do material com a absorção de umidade, decaimento fúngico, propriedades térmicas e mecânicas. Foram realizadas análises em relação a alterações no Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE), o qual foi correlacionado ao dano gerado na integridade dos corpos de prova devido a umidade e ao crescimento das colônias de fungos, de forma comparativa. Ensaios de condutividade térmica revelaram a influência da composição e da distribuição das fases no transporte de calor. Também foram realizados ensaios de flexão em corpos de prova colados com finger joint entre pinus e a matriz polimérica, visando aplicações onde há necessidade de resistência a umidade elevada. Nos ensaios de flexão, os WPCs apresentaram menor resistência mecânica e maior variabilidade em comparação à madeira maciça, comportamento associado à heterogeneidade estrutural e à eficiência da interface. De forma integrada, os resultados indicam que a morfologia e a qualidade da interface desempenham papel fundamental no controle simultâneo das propriedades térmicas e mecânicas. Esses achados contribuem para o entendimento do comportamento de WPCs e para o desenvolvimento de materiais adequados para diferentes aplicações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados três tipos de corpos de prova prismáticos de madeira maciça: cipreste amarelo do Alasca (*Cupressus nootkatensis*), *Pinus taeda* de alta e de baixa densidade (Figura 1 a, b, c). Além disso, foram utilizados dois tipos de WPCs com reforço de madeira na forma de pellets e maravalha, juntamente com corpos de prova (CPs) da matriz polimérica sem reforço de madeira (Figura 1 d, e, f), para comparar os efeitos dos diferentes tipos de reforço.

Figura 1 – (a) Cipreste amarelo do Alasca, (b) *Pinus taeda* de alta densidade, (c) *Pinus taeda* de baixa densidade, (d) matriz polimérica sem reforço, (e) WPC com 30% de pellets e (f) WPC com 30% de maravalha



Fonte: os autores, 2025.

Na Tabela 1 são descritas algumas propriedades dos CPs, sendo que as medidas foram realizadas no momento do recebimento, em condições ambiente.

Tabela 01 – Detalhamento dos corpos de prova utilizados nos experimentos

Corpos de prova	Umidade à seco (%)	Volume inicial (cm^3)	Massa inicial (g)	Densidade inicial (g/cm^3)	Condutividade térmica (W/mK)
Cipreste amarelo do Alasca	11,2 ± 0,1	162	81,70	0,49 ± 0,1	0,3 ± 0,01
Pinus Taeda AD	13,8 ± 0,1	218	150,58	0,69 ± 0,1	0,3 ± 0,01
Pinus Taeda BD	12,2 ± 0,1	226	108,48	0,47 ± 0,2	
Matriz polimérica	14,9 ± 0,1	110	119,94	1,11 ± 0,2	0,149 ± 0,019
WPC pellets	15,8 ± 0,1	137	148,39	1,1 ± 0,1	0,350 ± 0,006
WPC maravalha	13,9 ± 0,1	212	209,11	0,97 ± 0,1	0,117 ± 0,002

Fonte: Os autores, 2026.

Os compósitos madeira-plástico (WPCs) foram produzidos a partir da mistura e extrusão (150-180°C) de uma matriz polimérica com 30% de reforço de madeira. A matriz polimérica é composta de resíduos diversos de tipos de polímeros da indústria de injeção, polipropileno, PET, resíduos da indústria de fiação elétrica, polímeros diversos multi-camada e PVC. Já o reforço é composto de resíduos de madeiras diversas em formato de pellets e maravalha. Pellets são pequenos cilindros de resíduo moído compactado e maravalha são fibras curtas e finas.

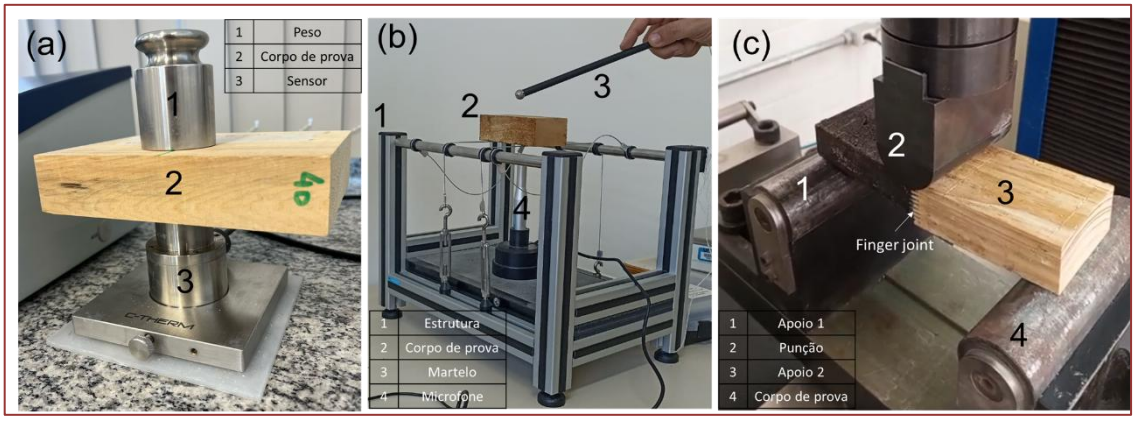
Cortou-se com serra circular de carbeto de tungstênio os CPs nas dimensões aproximadas de 11 x 3 x 3 cm, sendo a medida maior paralela às fibras das madeiras maciças e perpendicular ao sentido de extrusão dos WPCs. Cada CP foi medido com paquímetro 0,05 mm na largura, comprimento e espessura. Determinou-se a massa dos CPs com balança Marte científico, modelo AD3300 (precisão de 0,01 g). O teor de umidade foi medido com um hidrômetro compacto, marca Gann. Testes de condutividade térmica foram realizados utilizando um analisador C-Therm TCi, baseado no método de fonte plana transiente (LOG e Gustafsson, 1995), conforme mostra a Figura 2 a.

A caracterização da microestrutura foi realizada por meio de microscopia óptica com lâminas histológicas em regiões representativas de cada amostra, considerando aspectos morfológicos da orientação das fibras nas madeiras maciças e as interfaces entre o polímero e o reforço de pellets e maravalhas. Para isso foi utilizado um microscópio óptico Olympus, modelo UC30, com componentes de iluminação em LED para luz transmitida, em campo claro.

Realizou-se dois ciclos de imersão completa em água destilada durante 24 e 48 horas, sendo que a massa das amostras foi aferida após cada ciclo de imersão. Após o ciclo de imersão, as amostras foram acondicionadas em ambiente fechado e úmido durante 30 dias e então fotografadas, para evidenciar o crescimento de fungos.

Para as análises de Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE), foi utilizado um equipamento ATCP Engenharia Física, modelo Sonelastic® (Figura 2 b), com a técnica de excitação por impulso (ASTM, 2007), medindo na direção transversal, após 60 dias. Um tratamento matemático foi aplicado pelo software Sonelastic® no sinal medido para a obtenção do espectro de frequências (Cossolino e Pereira, 2010). A partir das frequências, dimensões, geometria e massa dos CPs obteve-se o MOE.

Figura 2 – Fotografia dos aparatos utilizados para ensaios de: (a) condutividade térmica; (b) módulo de elasticidade dinâmico (MOE) e (c) flexão em três pontos



Fonte: Os autores, 2026.

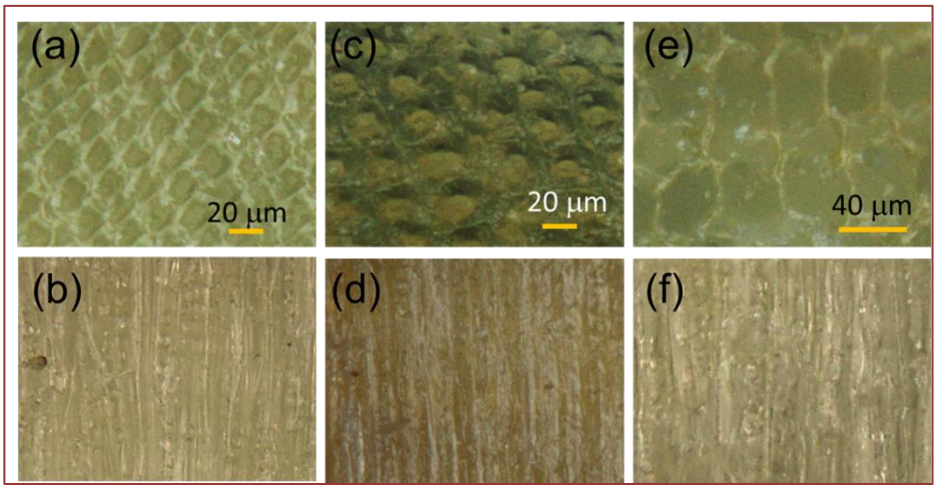
Para os ensaios de flexão em três pontos (Figura 2 c) utilizou-se uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL30000N, com célula de carga 300 kN. Os apoios foram colocados a uma distância de 100 mm e os corpos de prova com as dimensões 40 x 70 x 360 mm, foram confeccionados com corte e colagem tipo finger joint entre *Pinus taeda* de alta densidade e a matriz polimérica sem reforço. As emendas foram produzidas em linha industrial contínua. O perfil finger joint foi realizado com comprimento de 6,5 mm e passo de ≈ 3,8 mm. A madeira de *Pinus taeda* foi unida à matriz polimérica sem reforço, com adesivo do tipo D4 bicomponente Franklin, aplicado com gramatura aproximada de 200 g/m^2, na temperatura de 25 °C. A prensagem foi realizada sob pressão de 100 bar durante 5 s. Após a fabricação, os corpos de prova foram condicionados a temperatura e umidade ambiente até a realização dos ensaios.

3. RESULTADOS

3.1. ASPECTOS MORFOLÓGICOS

A Figura 3 apresenta micrografias por microscopia óptica das madeiras estudadas em dois planos anatômicos: seção transversal mostrando os lúmens e longitudinal evidenciando os traqueídeos. Na Figura 3 a e b, referentes à madeira cipreste amarelo do Alasca, observa-se uma distribuição relativamente homogênea dos lúmens, com diâmetro aproximado de 20 µm, na seção transversal e um alinhamento contínuo dos elementos celulares na direção longitudinal, indicando uma estrutura uniforme. Isso implica em elevada resistência à umidade devido a sua uniformidade e por consequência, maior resistência ao ataque de fungos.

Figura 3 - Micrografias de microscopia óptica das madeiras (a) cipreste amarelo do Alasca na secção transversal e (b) longitudinal; (c) Pinus taeda de alta densidade na transversal e (d) longitudinal; (e) Pinus taeda de baixa densidade na transversal e (f) longitudinal



Fonte: os autores, 2026.

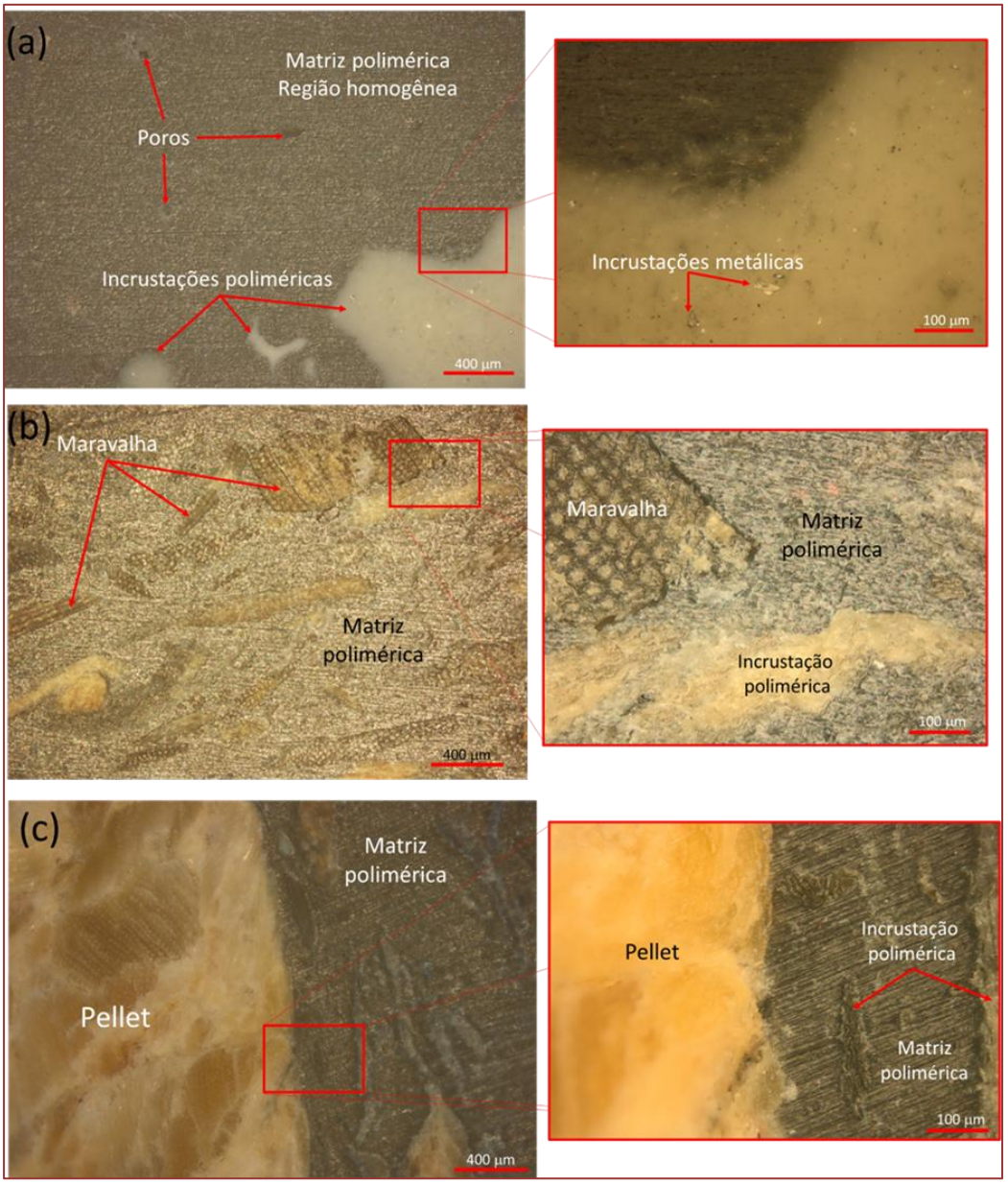
No *Pinus taeda* de alta densidade (Figura 3 c, d), nota-se lúmens com aproximadamente 20 µm, compactos na seção transversal, refletindo maior proporção de parede celular, enquanto na seção longitudinal os traqueídeos apresentam aspecto contínuo e pouco espaçamento entre estruturas, mas mais espaçado do que o cipreste. Já o *Pinus taeda* de baixa densidade (Figura 3 e, f) apresenta lúmens com o dobro do tamanho (40 µm) e maior espaçamento entre as paredes celulares, quando comparado às demais madeiras. Na seção longitudinal observa-se irregularidade e descontinuidade aparente entre os elementos celulares.

A diferença de idade entre as madeiras traz implicações diretas na sua morfologia e consequentemente na sua resistência à umidade. Além disso, madeiras mais antigas apresentam maior quantidade de extratos que as protegem de ataques biológicos. O cipreste amarelo do Alasca é uma madeira cortada com aproximadamente 30 anos, enquanto o pinus brasileiro é cortado dentro de 10 anos. Diferenças nas condições climáticas de crescimento e diferenças naturais da própria madeira, como proporção de lenho tardio, volume de lúmens, compactação da estrutura, distribuição de poros, quantidade de poros e espessura das paredes celulares podem gerar madeiras com maior ou menor densidade.

De forma geral, a comparação entre as madeiras evidencia que madeiras com maior porosidade, como o *Pinus taeda*, tendem a apresentar maior suscetibilidade à umidade e à degradação biológica, o que está diretamente relacionado à redução do módulo de elasticidade (MOE). Por outro lado, a madeira mais densa do cipreste do Alasca, que apresenta menor dimensão de lúmens e maior proporção de parede celular, apresenta maior resistência à absorção de umidade.

A Figura 4 apresenta micrografias do compósito madeira-plástico (WPC). Nas imagens pode ser visualizada a matriz polimérica, os reforços lignocelulósicos e as heterogeneidades associadas ao processamento e a variedade de materiais reciclados utilizados na fabricação.

Figura 4 - Micrografias: (a) da matriz polimérica sem reforço; (b) do WPC com maravalha e (c) do WPC com pellets



Fonte: os autores, 2026.

A Figura 4 a corresponde a matriz polimérica sem reforço onde observa-se uma região predominantemente composta pela matriz com aspecto relativamente homogêneo. Observam-se também incrustações de polímeros de diferentes formatos e tamanhos que não foram completamente homogeneizados durante o processo de fusão, além da presença de poros, que indicam aprisionamento de ar ou voláteis durante o processamento. São identificadas incrustações metálicas, evidenciando contaminação dos resíduos utilizados no processo industrial de reciclagem. De fato, a empresa que realiza esse trabalho não faz um controle rigoroso das matérias primas, no intuito de reduzir custos e utilizar a maior gama possível de plásticos que não são reciclados em rotas convencionais, mas que são viabilizadas neste processamento. Por exemplo, o

poliestireno expandido pode ser utilizado para fabricar vigas deste material, em misturas com diversos outros tipos de polímeros, aumentando a sustentabilidade do processo.

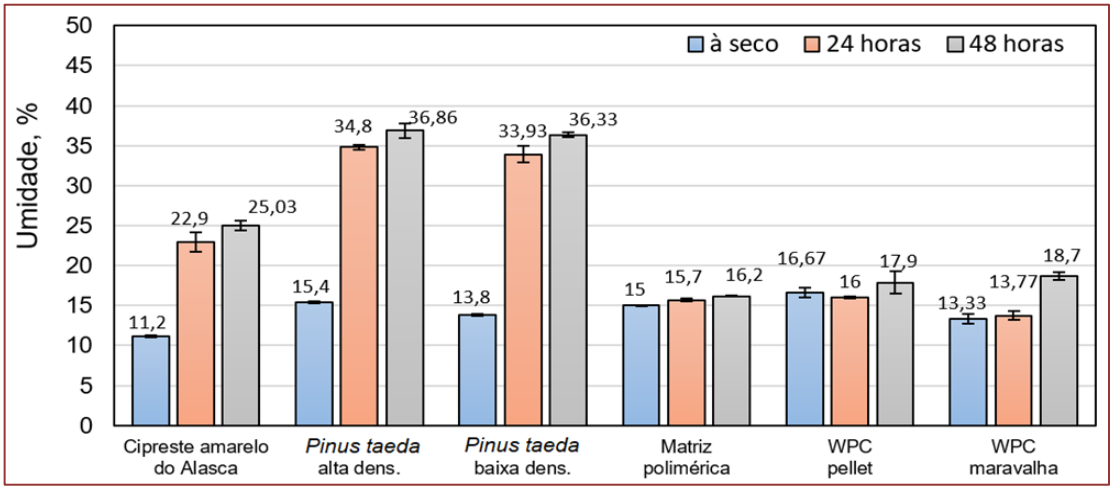
A Figura 4 b consiste na micrografia do WPC reforçado com maravalha, que apresenta distribuição não uniforme. A ampliação destaca a interface madeira–polímero, onde se verifica a presença de incrustações poliméricas, e a adesão da maravalha no polímero sugere que possivelmente há ancoragem mecânica, ainda que não completamente homogênea. O WPC com pellets é mostrado na Figura 4 c, onde nota-se que a interface entre o pellet e a matriz circundante é homogênea e a matriz polimérica contém incrustações poliméricas.

De forma geral, a microestrutura do WPC revela um material heterogêneo, com presença de poros, inclusões e distribuição não uniforme das fases. Esses aspectos estão diretamente relacionados ao processamento. Destaca-se ainda que o fabricante do material reciclado relata dificuldade em processar o material com reforço, devido a umidade presente na madeira de reforço, que sai em grande quantidade durante o processo de aquecimento e prensagem, tanto líquida como em forma de vapor para temperaturas mais elevadas.

3.2. ABSORÇÃO DE UMIDADE

Na Figura 5 é mostrado o gráfico comparativo do teor de umidade para as diferentes madeiras maciças, para a matriz polimérica e para os WPCs, em função do tempo de imersão. O cipreste amarelo do Alasca apresentou o menor teor de umidade inicial (11,2%), indicando que é naturalmente mais seco. Os dois tipos de *Pinus taeda* de alta e baixa densidade apresentam valores iniciais de 15,4% e 13,8%, respectivamente, sugerindo uma maior capacidade de absorver e reter água naturalmente.

Figura 05 – Teor de umidade para as madeiras maciças, matriz polimérica e WPCs, em função do tempo de imersão



Fonte: os autores, 2025.

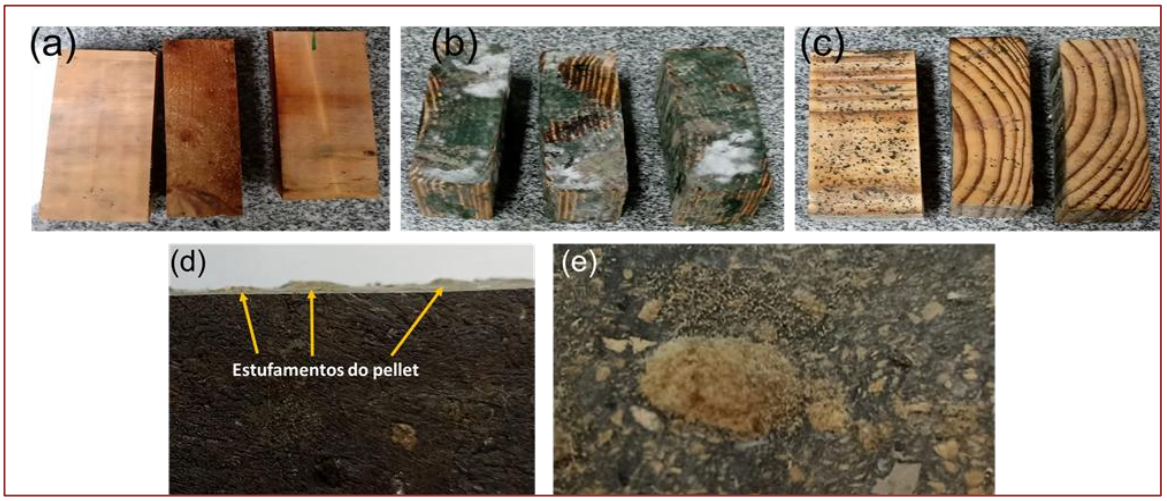
Após 24h de imersão o cipreste aumentou o teor de umidade para 22,9 %. Já o *Pinus taeda* de alta densidade aumentou para 34,8 %, enquanto o de baixa densidade foi para 33,93 %. Esses resultados sugerem que o cipreste apresenta maior resistência à absorção rápida de umidade em relação aos pinus. O ganho percentual de umidade após 48 h de imersão foi de 2,13 % para o cipreste, 2,06 % para o pinus de alta densidade e 2,4 % para o de baixa densidade, mostrando que a maior taxa de absorção acontece nas primeiras 24 horas. Os pinus absorveram quase 10% a mais de água que o cipreste e a densidade têm pouca influência na capacidade de absorção de água quando os CPs de pinus estão em imersão.

Os resultados da Figura 5 indicam que o teor de umidade inicial para a matriz polimérica (15,0 %) e para o WPC com pellets (16,67 %) é similar, levemente maiores que o WPC com maravalha (13,33 %). Isso sugere que a matriz polimérica reciclada tem alguma capacidade de retenção de umidade. Após as 24h de imersão, o teor de umidade na matriz aumentou 0,7 %, o WPC com pellets manteve-se em torno de 16 % (dentro do erro experimental) e o WPC com maravalha aumentou 0,44 %. Todos os materiais apresentaram menos de 1 % de absorção de água, o que demonstra resistência à umidade superior às madeiras maciças, dificultando a penetração rápida da água. A variação após 48 h de imersão indica que a matriz polimérica tem o comportamento mais estável, conforme se espera para o comportamento geral de um polímero, aumentando 0,5 % em relação às 24 h. Contudo, a introdução de pellets e maravalha reflete as diferenças na morfologia e distribuição dos reforços, fazendo com que houvesse absorção adicional de 1,9 e 4,93 % de umidade, respectivamente. O reforço de maravalha promoveu uma absorção maior de água a partir das 24 h, indicando que a forma mais fibrosa e distribuída dos resíduos de madeira cria canais que facilitam a penetração da água com o tempo. Desta forma, o reforço de pellets favorece a resistência à absorção de água em comparação à maravalha.

3.3. CRESCIMENTO FÚNGICO

Após 30 dias em contato com umidade os CPs foram fotografados, como mostra a Figura 6. Observa-se que a madeira cipreste amarelo do Alasca (Fig. 6 a) mostrou alta resistência ao ataque fúngico, sem crescimento visível de colônias. Esse comportamento pode ser atribuído à presença natural de compostos antifúngicos em espécies de ciprestes (OKINO et al., 2010). Entretanto, ao se comparar a coloração da madeira antes e depois do ensaio imersão (Figura 1 a em comparação à Figura 6 a) reforça-se a hipótese de penetração profunda de água, que alterou a refratividade da luz e/ou gerou oxidação de compostos, tornando-a mais escura.

Figura 06 – Aspecto dos CPs após 30 dias em contato com alta umidade (a) cipreste amarelo do Alasca, (b) *Pinus taeda* de alta densidade e (c) *Pinus taeda* de baixa densidade, (d) WCP com reforço de pellets com estufamento e (e) crescimento fúngico no reforço



Fonte: os autores, 2025.

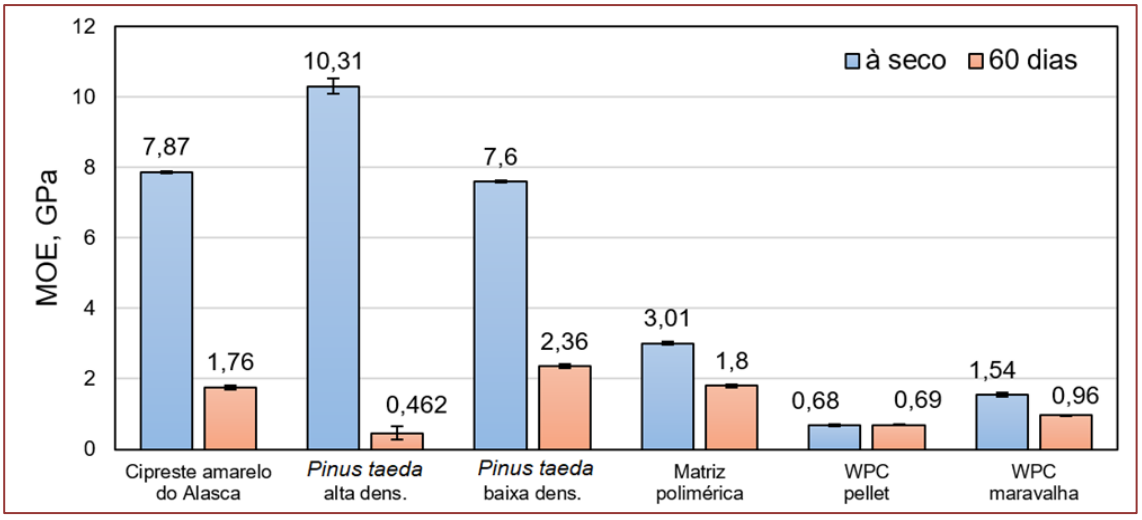
O *Pinus taeda* de alta densidade exibiu intenso desenvolvimento fúngico (branco e pardo) em todas as superfícies, indicando maior suscetibilidade à colonização (Figura 6 b). A sua maior densidade, conferida pelo maior teor de lignina, não impediu a infestação, possivelmente devido à disponibilidade de nutrientes ou à retenção de umidade suficiente para favorecer o crescimento microbiano. Segundo Schilling e colaboradores (2021) fungos de podridão branca, como por exemplo *Phialocephala dimorphospora*, um Ascomycota, degradam os três principais componentes estruturais da madeira, sendo que algumas espécies priorizam a degradação da lignina enquanto outros degradam os componentes juntos. Os fungos de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum* ou *Fomitopsis pinicola*, por exemplo, ambos Basidiomycota) degradam celulose e hemicelulose, mas não ou apenas parcialmente a lignina (Schilling et al., 2021). O *Pinus taeda* de baixa densidade também apresentou crescimento fúngico pardo, mas em quantidade menor e distribuição esparsa (Figura 6 c), principalmente ao longo das fibras (seção longitudinal) e nas regiões claras dos aneis de crescimento (lenho inicial), o que sugere que essas regiões menos densas e menos ricas em lignina, oferecem condições mais favoráveis ao crescimento dos fungos pardos, que se alimentam preferencialmente de celulose e hemicelulose.

Na amostra da matriz polimérica a inspeção visual não revelou crescimento de fungos, o que indica boa resistência biológica. Também no WPC com maravalha não verificou-se a formação de colônias, o que pode ser atribuído à distribuição uniforme e ao pequeno tamanho das fibras de maravalha. Em contraste, o WPC com pellets apresentou estufamento dos reforços (Figura 6 d) e colonização por fungos (Figura 6 e), concentrados na seção transversal, perpendicular à direção de extrusão. Devido ao maior tamanho e à distribuição irregular dos pellets, mas que ficam confinados principalmente no interior do compósito, formou-se regiões vulneráveis nas superfícies de corte dos CPs, facilitando a colonização fúngica.

3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOE)

Quando a madeira está seca, as paredes celulares estão firmes e o material é relativamente rígido. Ao entrar em contato com a água, ocorre sua penetração nas paredes celulares, separando os componentes celulose, hemicelulose e lignina, rompendo ou afrouxando as ligações de hidrogênio, diminuindo a coesão da estrutura celular e aumentando a deformabilidade da estrutura lignocelulósica. A avaliação do MOE foi realizada para quantificar essa diminuição, conforme mostrado na Figura 6. Quanto menor o valor do MOE, menor a rigidez do material, o que significa que ele apresenta menor resistência à deformação sob carga.

Figura 07 – Módulo de elasticidade para as madeiras maciças, matriz polimérica e WPCs, antes e após ataque fúngico



Fonte: os autores, 2025.

No cipreste amarelo do Alasca houve queda de 78% no MOE, saindo de 7,87 para 1,76 GPa, atribuindo-se o fenômeno exclusivamente ao efeito da absorção de umidade. Como resultado, houve uma redução significativa na rigidez transversal, onde a madeira se torna mais flexível, menos resistente e com maior capacidade de amortecer vibrações. Para o *Pinus taeda* de alta densidade os valores do MOE caíram ~95% e para o de baixa densidade 69%. Embora a quantidade de água absorvida pelos dois tipos de pinus tenha sido semelhante, a estrutura inicial mais rígida do pinus de alta densidade promoveu uma perda relativa mais acentuada. Além disso, a susceptibilidade ao ataque de fungos brancos, que se alimentam de lignina e introduzem descontinuidades superficiais, também podem ter contribuído para a redução no MOE no pinus de alta densidade. A colonização esparsa de fungos pardos no pinus de baixa densidade resultou em menor impacto nos valores medidos.

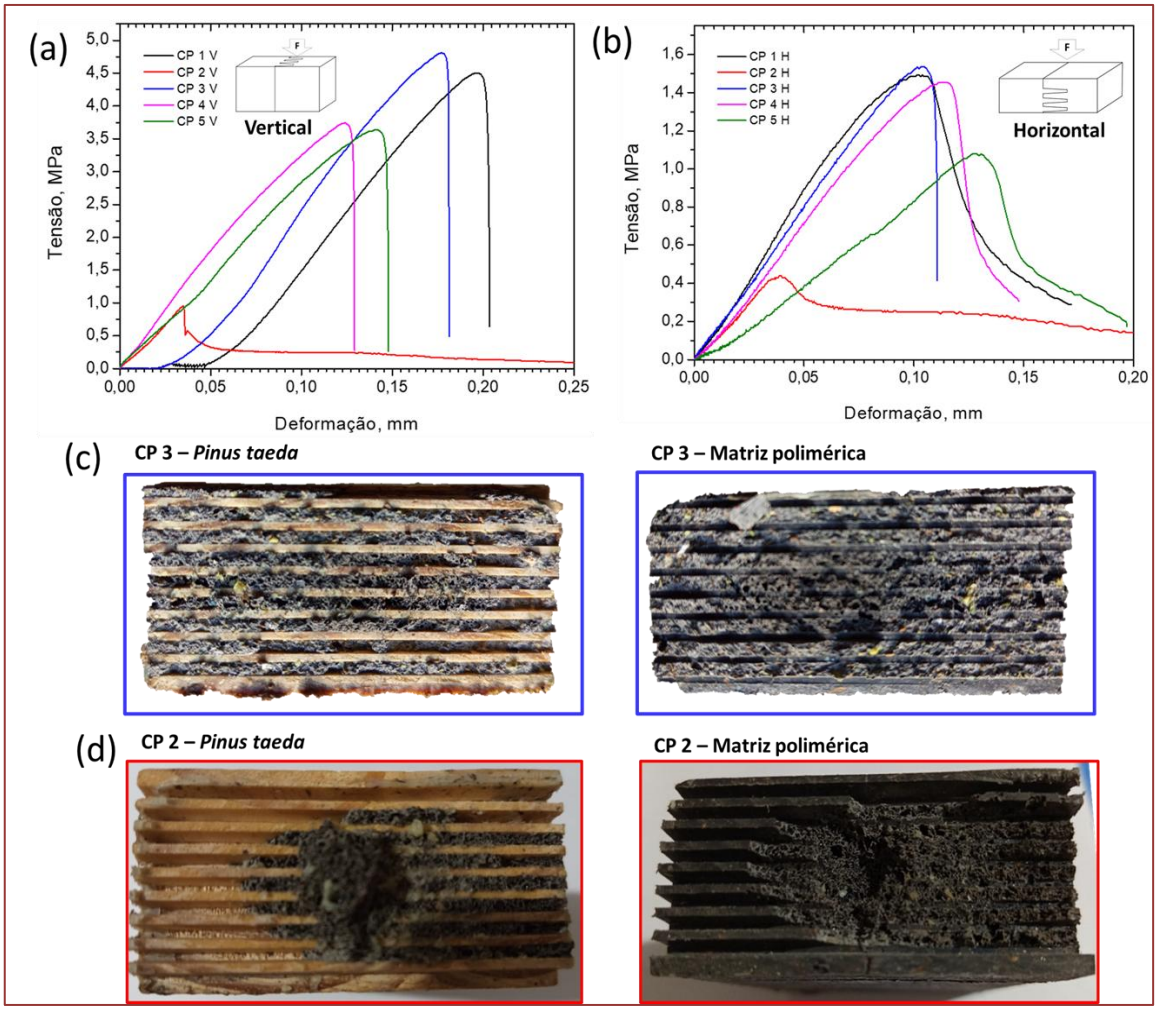
Mesmo sendo composta por resíduos de diferentes plásticos, a matriz polimérica apresentou redução significativa de MOE (~40%), devido a absorção de água em defeitos como porosidade e regiões amorfas presentes em polímeros reciclados. Não houve fungos visíveis, portanto a perda de rigidez está associada à ação da umidade, especialmente pela

natureza heterogênea da matriz. O WPC de maravalha apresentou MOE inicial menor (1,54 GPa), o que é esperado pela redução de fase polimérica contínua e presença de fibras finas e distribuídas. A queda de ~38 % foram similar à da matriz, sugerindo que a maravalha distribuída por toda a superfície externa, facilitou a entrada de umidade por criar canais, o que explica a maior queda na rigidez. Embora os pellets tenham apresentado estufamento localizado e colonização fúngica visível na seção transversal, sua localização interna e espaçada no interior da matriz polimérica limitou a absorção de água e, consequentemente, seu impacto nos valores medidos do MOE.

3.5. DESEMPENHO DE JUNTAS *FINGER JOINT*

A Figura 8 mostra as curvas dos ensaios de flexão em três pontos para cinco corpos de prova constituídos de *Pinus taeda* unido por finger joint com a matriz polimérica reciclada. A análise das curvas evidencia diferenças claras no comportamento mecânico das juntas em função da orientação (vertical e horizontal), bem como da qualidade da adesão na interface madeira–matriz polimérica.

Figura 8 - (a) Flexão em três pontos para finger joint ensaiada na vertical e (b) horizontal; (c) corpo de prova CP 3 rompido na horizontal, demonstrando a colagem efetiva e (d) CP 2 rompido na horizontal, evidenciando falta de adesivo



Fonte: os autores, 2026.

Para a configuração com finger vertical na Figura 8 a, os corpos de prova atingem tensões máximas elevadas, variando aproximadamente entre 3,5 e 4,8 MPa, com deslocamentos no pico entre 0,1 até 0,2 mm. O comportamento pós-pico é abrupto na maioria dos corpos de prova, com queda acentuada da tensão logo após o máximo. Isso indica uma falha frágil, com menor contribuição das fibras da madeira após a iniciação da ruptura, colocando a interface adesiva em uma condição mais desfavorável, com maior concentração de tensões e menor capacidade de redistribuição de esforços ao longo das fibras. A Figura 8 c mostra o CP 3 após a ruptura, para demonstrar a aplicação eficiente do adesivo, onde se observa rompimento do polímero e não da finger joint da madeira. Isso ocorre pois a madeira possui fibras longitudinais que aumentam a resistência. Já o polímero sem reforço fratura de forma frágil.

Por outro lado, na configuração com finger horizontal, Figura 8 d, os valores máximos de tensão são significativamente menores, situando-se entre aproximadamente 1 e 1,5 MPa, com deslocamentos no pico até concentrados entre 1 e 1,3 mm. Após o pico, a queda de tensão não é abrupta, indicando um regime pós-pico com contribuição significativa das fibras de *Pinus taeda*. Esse comportamento sugere que, mesmo após o início da falha adesiva ou coesiva, há mecanismos de ponteamento de fibras atuando, permitindo que a estrutura ainda suporte carga por um intervalo adicional de deformação. Essa resposta está associada à orientação da finger, que favorece a transferência de esforços ao longo das fibras, retardando a ruptura completa.

Comparando os dois arranjos, fica evidente que a orientação vertical das fingers promove maior eficiência mecânica, em termos de capacidade de carga. Já a orientação horizontal oferece maior tenacidade no trecho final das curvas, onde ainda se observa resistência após o pico, e isso é particularmente relevante, pois indica que as fibras de madeira continuam atuando mesmo após a degradação inicial da junta, contribuindo para um comportamento mais seguro e menos abrupto.

Um ponto importante é o comportamento da amostra CP 2, tanto vertical como horizontal, que apresenta curvas atípicas, com tensão máxima reduzida (0,95 MPa na vertical e 0,44 MPa na horizontal) e uma queda precoce seguida de um regime residual em baixas tensões. Esse resultado está diretamente associado à aplicação insuficiente de adesivo, o que compromete a integridade da junta desde o início do carregamento. Nesse caso, a falha ocorreu predominantemente na interface adesiva, como mostra a Figura 8 d.

Por fim, destaca-se que, mesmo com as variações observadas, todas as juntas avaliadas apresentaram desempenho superior ao requisito mínimo de resistência especificado pelo fabricante (27 PSI, que equivale a aproximadamente 0,186 MPa). Esses resultados evidenciam a viabilidade técnica da solução proposta. No entanto, os resultados também deixam claro que a orientação geométrica da finger joint e o controle do processo de colagem são determinantes para o desempenho final, especialmente em sistemas híbridos envolvendo madeira e matriz polimérica.

4. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos indicam que o desempenho dos materiais avaliados está fortemente relacionado à sua capacidade de absorver umidade e às consequências desse processo sobre o crescimento fúngico e a estabilidade mecânica. O comportamento semelhante observado para o *Pinus taeda* de alta e baixa densidade sugere que a variação de densidade, nas condições analisadas, não foi suficiente para alterar significativamente a

suscetibilidade à umidade e à degradação biológica. Esse resultado indica que outros fatores, como permeabilidade e composição do material, podem exercer maior influência na durabilidade.

Nos compósitos madeira-plástico, a presença de fase lignocelulósica influenciou diretamente a suscetibilidade ao crescimento fúngico. O maior desenvolvimento de fungos nos materiais com reforço em pellet pode estar associado à maior área de exposição dessa fase ao meio, enquanto os compósitos com maravalha apresentaram comportamento intermediário, sugerindo que a morfologia do reforço influencia a interação com a umidade.

A matriz polimérica reciclada sem reforço apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à umidade e ao crescimento fúngico. A ausência de uma fase lignocelulósica contínua reduz tanto a absorção de água quanto a disponibilidade de substrato para o desenvolvimento de microrganismos, contribuindo para maior estabilidade do material.

Os resultados mecânicos confirmam a relação entre degradação ambiental e redução do módulo de elasticidade dinâmico (MOE). No entanto, para a aplicação estudada, o desempenho da união entre os materiais mostrou-se mais relevante do que as propriedades individuais isoladas.

Os ensaios de flexão das juntas finger joint demonstraram que o polímero reciclado pode ser utilizado em combinação com *Pinus taeda*, apresentando desempenho mecânico equivalente ao do sistema tradicional com cipreste amarelo do Alasca. Também pode-se destacar que a união madeira-matriz polimérica foi realizada utilizando aparato industrial idêntico àquele usado atualmente para produzir a união cipreste-pius. Nesse contexto, há ainda espaço para pesquisas futuras visando otimização da quantidade e até mesmo do tipo de adesivo utilizado, uma vez que os resultados dos testes de flexão são praticamente dez vezes superiores ao valor mínimo exigido para o produto. Esse resultado reforça a importância da qualidade da aplicação do adesivo e da integridade da interface na junta formada entre os materiais.

5. CONCLUSÕES

A madeira cipreste amarelo do Alasca (*Cupressus nootkatensis*) apresentou menor absorção de umidade e susceptibilidade a ataques fúngicos em comparação ao *Pinus taeda*. A matriz polimérica e os WPCs com reforço apresentaram resistência à água muito superior às madeiras maciças e apenas o WPC com pellets foi suscetível a fungos nas superfícies de corte.

A redução do módulo de elasticidade (MOE) do cipreste amarelo do Alasca foi 78%, para o pinus de alta e baixa densidade 95% e 69%, respectivamente. A matriz reciclada e o WPC com maravalha tiveram queda de aproximadamente 40%, e em contrapartida, o WPC com pellets, mesmo apresentando sinais de colonização fúngica localizada, teve comportamento mecânico estável, o que destaca o papel da morfologia dos reforços na proteção da matriz e na retenção das propriedades mecânicas.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que é viável recomendar o uso de WPCs como substitutos parciais da madeira maciça em aplicações não estruturais, especialmente em ambientes sujeitos à umidade, como rodapés, batentes, revestimentos e mobiliário externo protegido. Os ensaios mecânicos demonstraram que quando as juntas entre *Pinus taeda* e o polímero reciclado são adesivadas de forma homogênea, a resistência pode ser

superior às juntas com cipreste do Alasca, indicando a viabilidade técnica da substituição do cipreste por polímero reciclado na aplicação estudada.

REFERÊNCIAS

[1] **ASHORI, A.; NOURBAKHSH, A.** *Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials.* Waste Management, v. 29, p. 1291–1295, 2009.

[2] **ASTM** *International. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration;* **ASTM E 1876**. 2007. 15 p. Disponível em: https://store.astm.org/e1876-22.html. Acesso em: 27 abr. 2025.

[3] **BAHRAMIAN, M., YETILMEZSOY, K**. *Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018)*. Energy and Buildings, n. 219, p. 109917, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917. Acesso em: 8 abr. 2025.

[4] **BOLIN, C. A.; SMITH**, **S.** *Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking*. Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 6–7, p. 620–629, 2011. ISSN 0959-6526. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610004567 . Acesso em: 8 abr. 2025.

[5] **COSSOLINO, L.C., PEREIRA, A. H. A**. *Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Informativo Técnico* – ATCP Engenharia Física, 2010. Disponível em: https://sonelastic.com/images/RT03-ATCP.pdf. Acessado em: 27 abr. 2025.

[6] **HOSSEINIHASHEMI, S. K.; ARWINFAR, F.; NAJAFI, A.; NEMLI, G.; AYRILMIS, N**. *Long-term water absorption behavior of thermoplastic composites produced with thermally treated wood*. Measurement, v. 86, p. 202–208, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.058. Acesso em: 11 abr. 2025.

[7] **JONES, D.; BRISCHKE, C. (Ed.)**. *Wood as bio-based building material. In: ____. Performance of Bio-based Building Materials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. p. 21–96. ISBN 9780081009826. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081009826000021 . Acesso em: 8 abr. 2025.

[8] **LI, A.; VAN DEN BULCKE, J.; DE WINDT, I.; DEFOIRDT, N.; DHAENE, J.; DIERICK, M.; SOL, H.; VAN ACKER, J.**. *Relating MOE decrease and mass loss due to fungal decay in plywood and MDF using resonalyser and X-ray CT scanning*. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 110, p. 113-120, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.012. Acesso em: 27 abr. 2025.

[9] **LI, H.; ZHANG, H.; FENG, Z.; ZHAO, J.; CHEN, H.; GUO, X.; WANG, T.; LIU, Y.** *Climate change influences on vegetation photosynthesis in the Northern Hemisphere*. Journal of Environmental Management, v. 380, p. 124976, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124976 . Acesso em: 11 de abr. 2025.

[10] **LOCK, P.; LEGG, P.; WHITTLE, L.; BLACK, S**. *Global Outlook for Wood Markets to 2030: Projections of future production, consumption and trade balance*. Canberra: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, 2021. (Research Report 21.16). Acesso em: 8 abr. 2025.

[11] **MEYER, L.; BRISCHKE, C**. *Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species*. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 103, p. 23–29, set. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.009 . Acesso em:

[12] **OKINO, E. Y. A.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. da S.; MELO, J. E. de; CORADIN, V. T. R.; SOUZA, M. R. de; TEIXEIRA, D. E.; SOUSA, M. E. de**. *Technological characterization of Cupressus spp. wood.* Floresta e Ambiente, v. 17, n. 1, p. 1–11, 2010. DOI: https://doi.org/10.4322/floram.2011.002. ISSN 2179-8087. Acesso em: 30 abr. 2025.

[13] **SCHILLING, M.; FARINE, S.bylle; PÉROS, Jean-Pierre; BERTSCH, Christophe; GELHAYE, Eric**. *Wood degradation in grapevine diseases*. *In*: *MOREL-ROUHIER, Mélanie; SORMANI, Rodnay (ed.)*. Advances in Botanical Research. London: Academic Press, 2021. v. 99, cap. 6, p. 175–207. ISBN 9780128216866. Disponível em: https://doi.org/10.1016/bs.abr.2021.05.007. Acesso em: 28 abr. 2025.

[14] **SONELASTIC**. *Determinação dos módulos elásticos de madeiras e derivados empregando a Técnica*

de Excitação por Impulso. Disponível em: https://www.sonelastic.com/pt/fundamentos/bases/ensaio-modulos-elasticos-madeiras.html. Acesso em: 27 abr. 2025.

[15] **SVATOŠ-RAŽNJEVIĆ, H.; OROZCO, L.; MENGES, A**. *Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000–2021.* Buildings, v. 12, n. 4, p. 404, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings12040404 . Acesso em: 11 de abr. 2025.

[16] **TOGHYANI, A.; MATTHEWS, S.; VARIS, J.** *Forming challenges of extruded wood plastic composite products in a post-production process*. Procedia CIRP, v. 93, p. 502–507, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.156 . Acesso em: 10 de abr. 2025.

[17] **VOULPIOTIS, K.; KÖHLER, J.; JOCKWER, R.; FRANGI, A**. *A holistic framework for designing for structural robustness in tall timber buildings*. Engineering Structures, v. 227, p. 111432, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111432 . Acesso em: 11 de abr. 2025.

[18] **ZHOU, H.; LI, W.; HAO, X.; ZONG, G.; YI, X.; XU, J.; OU, R.; WANG, Q.** *Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: a sustainable strategy for clean and cyclic processing in the WPC industry*. Journal of Materials Research and Technology, v. 18, p. 1–14, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.091 . Acesso em: 11 abr. 2025.

Capítulo 4

Uso da casca de mamona como alternativa sustentável para Economia Circular no campo

Tatiana de Freitas Silva
Nathalia Vieira Barbosa
João Otávio Costa Almeida
Wesley Wagner de Melo Lopes

Resumo: O presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento da casca de mamona para melhoria das propriedades do solo por meio da produção de biochar via pirólise lenta, bem como analisar seus efeitos sobre as características físico-químicas do solo cultivado com Allium cepa (cebola). O biochar foi obtido em forno mufla a 300 °C por 15 minutos, a partir da casca de mamona coletada na região, material frequentemente encontrado e muitas vezes descartado em lotes urbanos e áreas abertas. Foram avaliadas diferentes concentrações de aplicação no solo (0%; 0,06%; 0,13% e 0,25%), além de um tratamento adicional utilizando casca de mamona apenas moída, sem processo de queima. As análises laboratoriais evidenciaram que a aplicação do material promoveu alterações importantes nas propriedades químicas do solo, com aumento da soma de bases, elevação da capacidade de troca catiônica (CTC) e maior disponibilidade de nutrientes, especialmente potássio. Também foram observadas variações no pH do solo e melhorias nos teores de matéria orgânica e carbono total, indicando potencial contribuição para a qualidade e fertilidade do solo. Durante o acompanhamento experimental, observou-se desenvolvimento mais vigoroso das plantas de cebola nos tratamentos com aplicação da casca de mamona, apresentando melhor aspecto visual em comparação ao solo sem adição do material. Do ponto de vista ambiental, o biochar obtido a partir da biomassa apresenta estrutura estável e rica em carbono, podendo contribuir para o sequestro de carbono e para a redução do descarte inadequado de resíduos vegetais. Dessa forma, o aproveitamento da casca de mamona demonstra potencial como alternativa sustentável para o manejo de resíduos orgânicos e melhoria das condições do solo, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 12, 13 e 15) e às estratégias de economia circular e agricultura de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: Pirólise, Fertilidade do solo, Resíduos agrícolas, Carbono, Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de resíduos orgânicos representa um dos desafios ambientais mais urgentes da atualidade, visto que, no Brasil, em 2015, cerca de 7,3 milhões de toneladas de resíduos tiveram destino inadequado (Zago; Barros, 2019).

Essa situação gera sobrecarga nos sistemas de tratamento e contribui para a emissão de gases de efeito estufa. Entre esses resíduos, destacam-se materiais de origem vegetal que, apesar de seu potencial agronômico, são frequentemente negligenciados ou descartados sem aproveitamento adequado.

Nesse contexto, a mamona (*Ricinus communis* L.) se apresenta como uma alternativa relevante. Trata-se de uma planta amplamente distribuída em áreas urbanas e rurais, sendo comumente encontrada em lotes vazios, terrenos baldios e margens de estradas, onde cresce de forma espontânea, evidenciado por Ferreira (2022). Apesar de sua abundância, a biomassa gerada, especialmente a casca do fruto, é geralmente desperdiçada, não sendo aproveitada como insumo agrícola.

Esse cenário evidencia uma oportunidade de valorização de um resíduo local, abundante e de baixo custo, que pode contribuir para práticas mais sustentáveis. A casca de mamona apresenta potencial como fonte de nutrientes, especialmente potássio, além de matéria orgânica, podendo atuar na melhoria da fertilidade do solo.

De acordo com Yameen et al. (2024), materiais orgânicos oriundos de biomassa vegetal podem apresentar elevada porosidade, estabilidade química e capacidade de retenção de nutrientes, características desejáveis para aplicações agrícolas. De forma complementar, Wang et al. (2024) destacam que insumos orgânicos podem melhorar a estrutura física do solo, aumentar a capacidade de troca de cátions (CTC), reduzir a lixiviação de nutrientes e favorecer a retenção de água.

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos vegetais como insumos agrícolas se apresenta como uma estratégia viável para promover a melhoria das propriedades do solo e, simultaneamente, reduzir impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Nesse contexto, este estudo busca avaliar o uso da casca de mamona moída e calcinada como adubo orgânico alternativo, investigando seus efeitos sobre as propriedades do solo e o desenvolvimento da cultura da cebola (*Allium cepa*). Foram analisadas diferentes concentrações do material, além da comparação com a casca apenas moída, permitindo avaliar a influência do processamento na eficiência agronômica.

Ao propor o reaproveitamento de um resíduo amplamente disponível e subutilizado, este trabalho se alinha aos princípios da economia circular, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao manejo inadequado de resíduos orgânicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto Federal do Sul de Minas Gerais – Campus Pouso Alegre, utilizando solo coletado na própria instituição.

Materiais e equipamentos

A matéria-prima utilizada foi a casca de mamona (*Ricinus communis* L.), coletada em áreas urbanas e rurais da região. Para o processamento do material, foram utilizados métodos simples, incluindo secagem natural, trituração em equipamento doméstico e calcinação

em forno mufla.

As análises laboratoriais do solo foram realizadas com apoio de laboratório especializado em análise de solo LabFert Análises.

Procedimentos experimentais

O desenvolvimento do projeto ocorreu em etapas sucessivas:

Coleta da biomassa

A mamona foi coletada em lotes urbanos e áreas rurais, sendo os frutos separados manualmente.

Secagem e separação

Os frutos foram submetidos à secagem natural ao sol. Após esse processo, realizou-se a separação manual das sementes e da casca, sendo esta última destinada ao experimento.

Trituração do material

A casca seca foi triturada até obtenção de material com granulometria reduzida.

Calcinação

O material triturado foi submetido à calcinação em forno mufla a 300 °C por 15 minutos, visando modificar suas propriedades físico-químicas e aumentar a disponibilidade de nutrientes.

Montagem do experimento

Foram preparados 5 vasos contendo 3,5 kg de solo cada, cultivados com *Allium cepa* (cebola).

Aplicação dos tratamentos

Os tratamentos consistiram em diferentes concentrações de casca de mamona moída e calcinada, além de um tratamento adicional com casca apenas moída (sem calcinação):

Controle (0%)

0,06% (m/m) – casca calcinada

0,13% (m/m) – casca calcinada

0,25% (m/m) – casca calcinada

Tratamento adicional: casca de mamona apenas moída

Condução do experimento

As plantas foram acompanhadas ao longo do desenvolvimento, com monitoramento visual e observação das condições do solo, como retenção de água e desenvolvimento vegetal.

Análises laboratoriais

Foram realizadas análises físico-químicas do solo antes e após a aplicação dos tratamentos, com o objetivo de avaliar alterações na fertilidade e nas propriedades estruturais.

Parâmetros analisados:

Matéria orgânica

pH ($CaCl_2$)

Fósforo (P)

Potássio (K)

Cálcio (Ca^{2+})

Magnésio (Mg^{2+})

Alumínio (Al^{3+})

Acidez potencial (H + Al)

Sódio (Na^{+})

Fósforo remanescente (P-rem)

Areia, silte e argila (análise granulométrica)

Soma de bases (SB)

Capacidade de troca catiônica (CTC)

Saturação por bases (V)

Relações entre nutrientes (Ca/Mg, Ca/K, Mg/K)

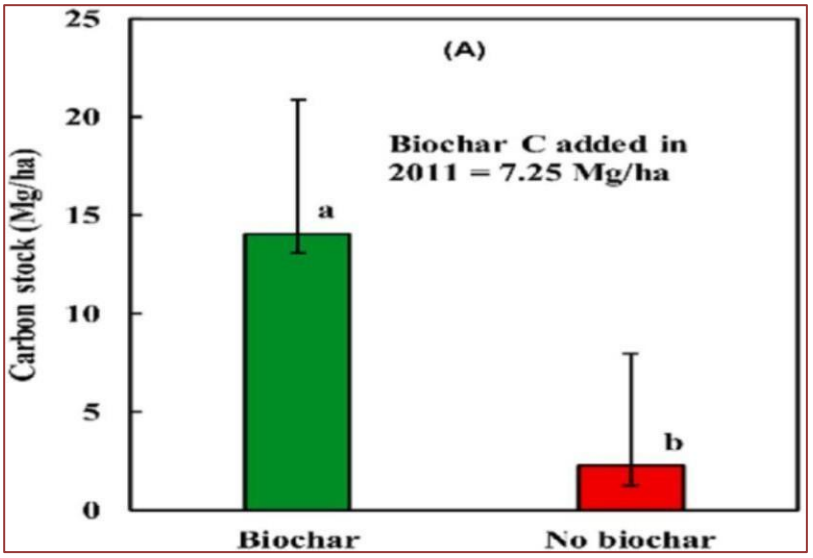
Carbono total

Essas análises permitiram avaliar as alterações promovidas pela aplicação da casca de mamona no solo, especialmente em relação à disponibilidade de nutrientes, equilíbrio químico e melhoria das propriedades físicas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

O biochar exerce um papel central no ciclo do carbono, funcionando como uma forma eficiente de sequestro desse elemento na matriz do solo. De acordo com K.N. Shoudho et al., a incorporação do biochar pode aumentar em mais de quatro vezes o estoque de carbono no solo, quando comparado a áreas sem sua aplicação. Esse resultado evidencia o potencial do material em contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que o carbono é retirado da atmosfera, por meio da biomassa, e estabilizado no solo sob a forma de carbono recalcitrante.

Figura 1 – Estoque de carbono no solo após aplicação de biochar



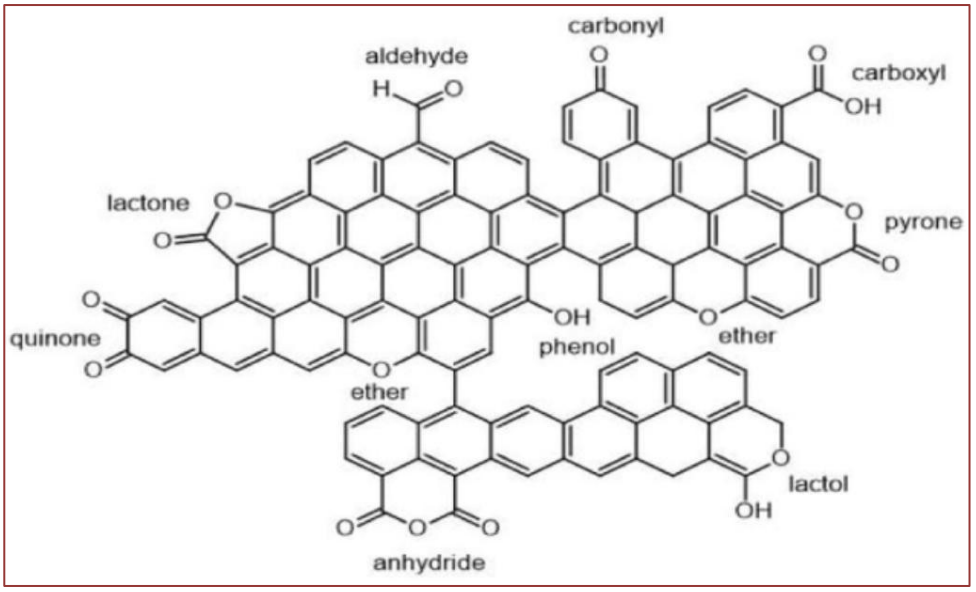
Fonte: K.N. Shoudho et al.

A Figura 1 ilustra esse efeito, destacando a expressiva elevação no armazenamento de carbono após a aplicação do biochar.

Segundo K.N. Shoudho et al. esse processo se deve à estrutura aromática do biochar, altamente resistente à degradação biológica, o que permite que o carbono fique retido no solo por longos períodos, variando de anos a décadas. Eles reforçam que o biochar se constitui em uma forma de carbono estável, com efeito direto na redução das emissões de gases de efeito estufa. Além de atuar como sumidouro de carbono, sua adição ao solo favorece a fertilidade, a retenção de água e os processos biogeoquímicos que estimulam o acúmulo de carbono natural.

Portanto, a participação do biochar no ciclo do carbono transcende o papel de simples condicionador de solo, configurando-se como uma estratégia de mitigação climática de alta relevância, alinhada a políticas globais de redução das emissões de CO_2 e a práticas agrícolas mais sustentáveis.

Figura 2 – Estrutura representativa da composição química do biochar



Fonte: K.N. Shoudho et al.

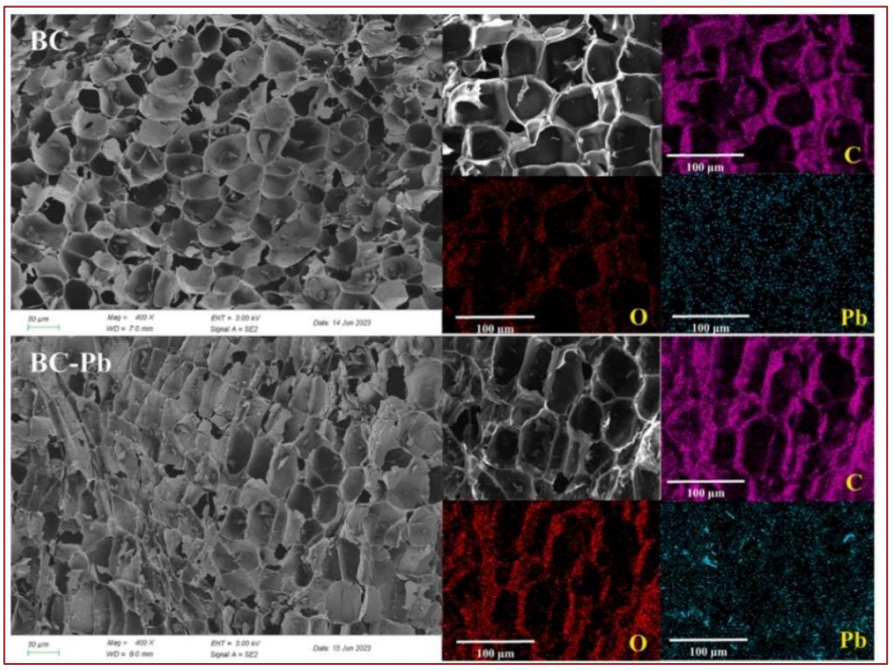
A estrutura química do biochar, apresentada na Figura 2, é composta majoritariamente por anéis aromáticos condensados, que formam uma rede estável de hexágonos de carbono interligados. Essa configuração confere ao material elevada estabilidade química e resistência à degradação microbiana, o que explica sua longa permanência no solo por décadas após a aplicação (K.N. Shoudho et al.).

Além do núcleo aromático recalcitrante, o biochar apresenta uma variedade de grupos funcionais oxigenados em sua superfície, como carboxilas (-COOH), carbonilas (C=O), hidroxilas fenólicas (-OH ligados ao anel aromático), éteres (C–O–C), lactonas, quinonas e anidridos. Esses grupos funcionais representam os polos ativos de adsorção, permitindo a interação com cátions (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) e moléculas orgânicas. Por esse motivo, o biochar promove o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e intensifica a retenção de nutrientes no solo (K.N. Shoudho et al.).

A heterogeneidade química é outro aspecto central. Embora a estrutura do biochar seja dominada por carbono aromático estável, as regiões funcionalizadas com oxigênio permanecem ativas, atuando no controle do pH e conferindo reatividade superficial. Essa dualidade estrutural – entre a durabilidade conferida pelos anéis aromáticos e a atividade agronômica dos grupos funcionais – explica a eficácia do biochar tanto como condicionador de solo quanto como agente de mitigação climática (K.N. Shoudho et al.).

Agronomicamente, a combinação entre estrutura porosa e grupos funcionais superficiais favorece uma maior retenção de água, a adsorção de fósforo e de metais, além de otimizar o aproveitamento de nutrientes pelas plantas. Paralelamente, o núcleo aromático estabiliza o carbono, promovendo o sequestro de CO_2 atmosférico e, consequentemente, contribuindo de maneira significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Figura 3 – Imagens de SEM-EDS do biochar antes e após a adsorção de Pb(II)



Fonte: Yuan et al. (2025).

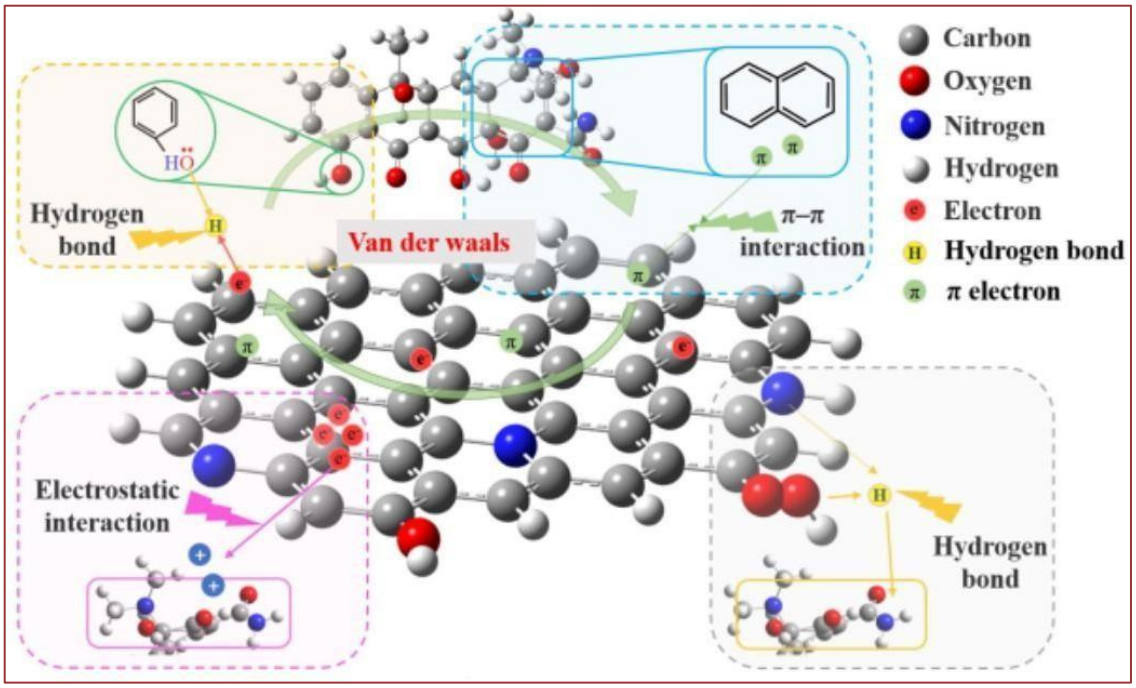
Na Figura 3 é possível observar, por meio das imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM-EDS), as diferenças estruturais do biochar antes e após o processo de adsorção de Pb(II). Nota-se a presença de partículas aderidas e a distribuição de chumbo sobre a superfície do biochar depois do contato com a solução contaminada, confirmando o sucesso da adsorção. Esses resultados reforçam o papel dos grupos funcionais oxigenados e da estrutura porosa do biochar na fixação de íons metálicos pesados, destacando sua eficácia como material adsorvente (Yuan et al., 2025).

O estudo de Yuan et al. (2025) demonstra que o biochar derivado de resíduos da medicina tradicional chinesa atua como um adsorvente eficiente e de baixo custo para a remoção de chumbo em águas contaminadas. Segundo os autores, o mecanismo de remoção de Pb^{2+} envolve principalmente: precipitação superficial, complexação com grupos funcionais oxigenados (como carboxilas e fenóis), e troca iônica entre cátions presentes no biochar (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) e o chumbo da solução.

Esses mecanismos reforçam a importância da estrutura heterogênea do biochar, capaz de combinar estabilidade aromática com superfícies reativas ricas em grupos funcionais.

Além disso, os autores destacam que a utilização de resíduos de fitoterápicos como matéria-prima para a produção de biochar representa uma alternativa sustentável, evitando que esses resíduos se tornem passivos ambientais e, ao mesmo tempo, criando um material de alto valor agregado para aplicações ambientais. Assim, o biochar mostra-se promissor não apenas para tratamento de solos agrícolas, mas também como estratégia para o tratamento de águas residuais contaminadas por metais pesados, reforçando seu papel multifuncional no contexto da sustentabilidade ambiental.

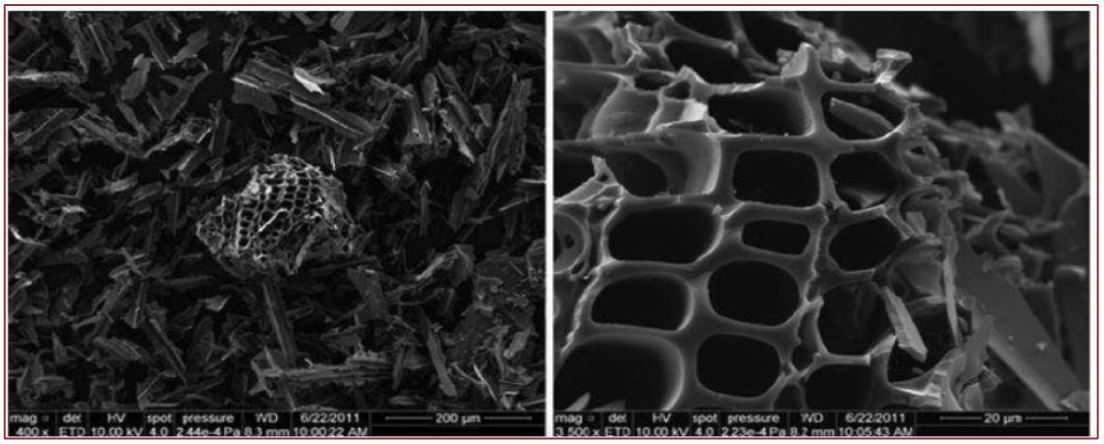
Figura 4 – Ilustração esquemática dos micromecanismos possíveis para a adsorção de tetraciclina (TTC) no biochar



Fonte: Zhang et al. (2024).

Na Figura 4, é possível observar os principais mecanismos de interação da tetraciclina com o biochar, evidenciando a multifuncionalidade da superfície do material (Zhang et al.,). A imagem mostra que a adsorção não ocorre por um único processo, mas pela ação combinada de interações eletrostáticas entre grupos funcionais carregados do biochar e as moléculas de tetraciclina, ligações de hidrogênio envolvendo grupos –OH e – COOH do biochar e grupos polares do antibiótico, interações π–π entre os anéis aromáticos da tetraciclina e a estrutura aromática do biochar, troca iônica entre cátions da superfície e íons do antibiótico, além de complexação com grupos funcionais oxigenados. Essa diversidade de mecanismos, evidenciada na figura, depende de fatores como pH, temperatura, porosidade e composição química do biochar, bem como da estrutura da tetraciclina, reforçando a importância de otimizar as propriedades do biochar para maximizar sua capacidade de remoção de antibióticos de soluções aquosas (Zhang et al.).

Figura 5 – Imagens microscópica evidenciando a estrutura porosa do biochar



Fonte: K.N. Shoudho et al.

Na Figura 5 observa-se, por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM), a estrutura altamente porosa do biochar. A presença de microporos e mesoporos, aliada a uma superfície rugosa, confere ao material elevada área superficial e grande potencial de adsorção. Essas propriedades estruturais estão diretamente associadas à capacidade do biochar de reter contaminantes, água e nutrientes, além de contribuir para sua estabilidade no solo e no ciclo global do carbono (K.N. Shoudho et al.).

As características estruturais observadas na Figura 5, como a elevada porosidade e a ampla superfície rugosa do biochar, não apenas explicam sua capacidade de adsorção de contaminantes e retenção de água e nutrientes, mas também refletem o efeito do processo de carbonização da biomassa. Essas propriedades são diretamente influenciadas pelas condições de pirólise, que determinam a formação de microporos, mesoporos e a estabilidade química do material.

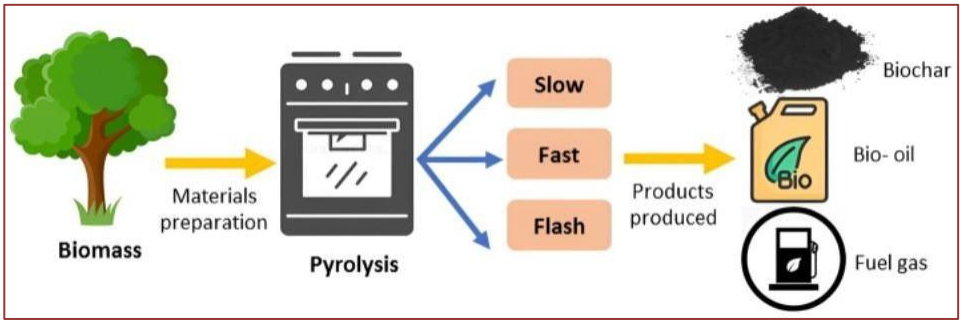
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente pesquisa encontra-se diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, em especial os ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre), os quais visam promover práticas agrícolas mais sustentáveis, mitigar os impactos ambientais e estimular o uso racional dos recursos naturais (PNUD Brasil, s.d.). O aproveitamento da casca de café para produção de biochar contribui para esses objetivos ao reduzir o volume de resíduos orgânicos descartados inadequadamente, diminuir a emissão de gases de efeito estufa e, simultaneamente, melhorar a fertilidade dos solos.

Além disso, este trabalho dialoga com a agenda da COP 30, conferência internacional que será sediada no Brasil, cuja pauta central está diretamente ligada à transição para uma economia de baixo carbono e ao fortalecimento de ações voltadas para o enfrentamento da crise climática. Nesse sentido, o uso de biochar como tecnologia sustentável se apresenta como uma estratégia coerente com as recomendações e diretrizes discutidas na conferência, visto que favorece tanto o sequestro de carbono quanto a valorização de resíduos agrícolas (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2025).

Outro fator interessante a ser comentado é que o projeto se relaciona com compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, como os previstos no Protocolo de Quioto, o qual estabeleceu mecanismos globais para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a promoção de alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental. Ao propor a conversão de resíduos agrícolas em biochar e sua aplicação em solos cultiváveis, esta pesquisa contribui com os esforços nacionais de mitigação de carbono e reforça a necessidade de ampliar práticas agrícolas de base sustentável (Ministério do Meio Ambiente, 2025).

Figura 6 – Representação esquemática do processo de pirolise



Fonte: Yameen et al.

A figura 6 representa o processo básico da formação de biochar através da pirólise de uma biomassa.

A utilização da casca de mamona como insumo agrícola envolve etapas de processamento físico e térmico que influenciam diretamente suas propriedades. A biomassa vegetal, quando submetida a processos como a calcinação em temperaturas controladas, sofre transformações que podem aumentar a disponibilidade de nutrientes minerais e modificar sua estrutura, favorecendo sua aplicação no solo.

No presente estudo, a casca de mamona foi submetida à calcinação em forno mufla a 300 °C por 15 minutos, sem a intenção de produção de subprodutos como gases ou bio-óleo, mas sim de obter um material com maior estabilidade e potencial agronômico. Diferentemente de processos industriais mais complexos, a metodologia adotada priorizou simplicidade e viabilidade local, visando sua aplicação em pequena escala.

As características finais do material obtido dependem diretamente da matéria-prima utilizada e das condições de processamento, como temperatura e tempo de exposição. Esses fatores influenciam a disponibilidade de nutrientes, a reatividade do material e sua interação com o solo, sendo determinantes para sua eficiência como fertilizante orgânico alternativo.

Com esses experimentos foram enviados para analises pelo Laboratório LabFert Análises:

Tabela 1 - Analise de pH, P e K

Tratamentos	pH	Fósforo (mg/dm3)	Potássio (mg/dm3)
0%	6,9	58,2	660,27
0,06%	6,5	66	2036,97
0,13%	7,2	48,5	1781,52
0,25%	7,8	45,5	2014,74
Sem queima	7	69,5	1885,26

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises

A análise do pH do solo após a aplicação da casca de mamona moída e calcinada indicou uma tendência de aumento conforme a elevação das concentrações aplicadas. O tratamento com 0,25% apresentou o maior valor de pH (7,8), enquanto o solo controle apresentou pH de 6,9. Esse comportamento sugere que a adição do material promove efeito alcalinizante no solo, possivelmente devido à presença de bases na composição da casca após a calcinação. A elevação do pH pode melhorar as condições para a disponibilidade de nutrientes em solos ácidos, reduz a solubilidade de alumínio tóxico e favorece o desenvolvimento radicular como confirmado por (Ronquim, 2010).

Em relação ao fósforo (P), os resultados não apresentaram uma tendência linear com o aumento das doses. O maior valor foi observado no tratamento "sem queima" (69,5 mg/dm^3), seguido pelo tratamento com 0,06% (66 mg/dm^3). Já nas maiores concentrações calcinadas (0,13% e 0,25%), houve redução nos teores de fósforo. Esse comportamento pode indicar que o processo de calcinação influencia a disponibilidade desse nutriente, possivelmente promovendo transformações que afetam sua solubilidade no solo.

Para o potássio (K), observou-se um aumento expressivo em todos os tratamentos com aplicação de casca de mamona em comparação ao controle (660,27mg/dm^3). O tratamento com 0,06% apresentou o maior valor (2036,97 mg/dm^3), seguido por 0,25% (2014,74 mg/dm^3) e pelo tratamento sem queima (1885,26 mg/dm^3). Esses resultados indicam que a casca de mamona, tanto calcinada quanto in natura, é uma fonte significativa de potássio, contribuindo diretamente para o aumento desse nutriente no solo.

De forma geral, os resultados demonstram que a aplicação da casca de mamona influencia significativamente as propriedades químicas do solo, especialmente no aumento do pH e na disponibilidade de potássio. Além disso, evidenciam que o processo de calcinação pode alterar a dinâmica de alguns nutrientes, como o fósforo, sendo um fator importante a ser considerado na eficiência agronômica do material.

Tabela 2 - Analise de MacroNutrientes trocáveis

Tratamentos	Potássio mmolc/dm3	Cálcio mmolc/dm3	Magnésio mmolc/dm3	Sódio mmolc/dm3
0%	16,93	38,3	8,7	67,20
0,06%	52,23	37,2	9,00	62,20
0,13%	45,68	31,5	5,00	64,5
0,25%	51,66	17,9	3,00	60,3
Sem queima	48,34	43,5	11,3	59,00

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise dos macronutrientes trocáveis evidenciou alterações significativas na composição química do solo após a aplicação da casca de mamona moída e calcinada, bem como no tratamento com o material sem queima.

Em relação ao potássio (K), observou-se aumento expressivo em todos os tratamentos com aplicação da casca de mamona quando comparados ao solo controle (16,93). O maior valor foi registrado no tratamento com 0,06% (52,23), seguido por 0,25% (51,66), 0,13% (45,68) e pelo tratamento sem queima (48,34). Esses resultados reforçam o potencial da casca de mamona como fonte relevante de potássio para o solo, indicando que mesmo em baixas concentrações o material é capaz de elevar significativamente a disponibilidade desse nutriente essencial para o desenvolvimento vegetal.

Para o cálcio (Ca), observou-se comportamento distinto. O tratamento sem queima apresentou o maior valor (43,5), superando inclusive o solo controle (38,3). Por outro lado, nos tratamentos com material calcinado houve redução progressiva dos teores conforme o aumento da concentração aplicada, sendo o menor valor registrado no tratamento de 0,25% (17,9). Esse resultado pode indicar que o processo de calcinação e as interações químicas no solo influenciam a dinâmica desse nutriente.

No caso do magnésio (Mg), os valores mais elevados foram observados no tratamento sem queima (11,3) e no tratamento com 0,06% (9,0), ambos superiores ao controle (8,7). Entretanto, nas maiores concentrações calcinadas (0,13% e 0,25%) ocorreu redução considerável nos teores desse nutriente, sugerindo possível influência das reações químicas promovidas pela aplicação do material calcinado no equilíbrio entre cátions no solo.

Quanto ao sódio (Na), verificou-se uma tendência de redução em todos os tratamentos quando comparados ao solo controle (67,20). O menor valor foi observado no tratamento sem queima (59,00), seguido pelos tratamentos com 0,25% (60,3) e 0,06% (62,20). Essa diminuição pode ser considerada positiva, uma vez que níveis elevados de sódio podem prejudicar a estrutura do solo e o desenvolvimento das plantas.

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação da casca de mamona influencia diretamente a dinâmica dos macronutrientes trocáveis no solo, especialmente promovendo aumento significativo nos teores de potássio e redução nos níveis de sódio. Além disso, observa-se que o tratamento com a casca sem queima apresentou desempenho relevante para cálcio e magnésio, sugerindo que diferentes formas de processamento do material podem impactar de maneira distinta a fertilidade do solo.

Tabela 3 - Analise de Acidez do solo

Tratamentos	pH	H + Al (mmolc/dm^3)	Al^{3+} (mmolc/dm^3)
0%	6,9	20	N/D
0,06%	6,5	18	N/D
0,13%	7,2	9	N/D
0,25%	7,8	8	N/D
Sem queima	7	14	N/D

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise da acidez do solo mostra que a aplicação da casca de mamona, principalmente na forma calcinada, contribuiu para a redução da acidez potencial do solo. Observa-se que

os valores de H + Al diminuíram conforme aumentou a concentração aplicada, passando de 20 no solo controle (0%) para 9 e 8 nos tratamentos de 0,13% e 0,25%, respectivamente. Esse comportamento indica melhora nas condições químicas do solo, de fertilidade e redução de acidez.

Em relação ao pH, também se verifica uma tendência de elevação nos tratamentos com maiores concentrações, atingindo 7,8 no tratamento de 0,25%, o que sugere efeito corretivo semelhante ao observado em materiais carbonizados aplicados ao solo. O tratamento sem queima apresentou resultado intermediário, com pH 7 e redução moderada de H + Al.

Já o Al^{3+} não foi detectado (N/D) em todos os tratamentos, indicando ausência de alumínio trocável em níveis detectáveis nas amostras analisadas. De forma geral, os resultados sugerem que a aplicação da casca de mamona pode contribuir para a melhoria da acidez do solo, favorecendo condições mais adequadas para o desenvolvimento das plantas.

Tabela 4 – Capacidade de troca e Fertilidade

Tratamentos	S.B. (mmolc/dm^3)	CTC (mmolc/dm^3)	V %
0%	63,96	83,96	76,18
0,06%	98,39	118,39	84,53
0,13%	82,18	91,18	90,13
0,25%	72,48	80,48	90,06
Sem queima	103,8	117,8	88,04

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise da capacidade de troca e da fertilidade do solo indica que a aplicação da casca de mamona influenciou de forma significativa os parâmetros avaliados quando comparados ao solo controle. Observa-se que a soma de bases apresentou aumento em todos os tratamentos com aplicação do material. O maior valor foi registrado no tratamento sem queima (103,8 mmolc/dm^3), seguido pelo tratamento de 0,06% (98,39 mmolc/dm^3). Já as concentrações de 0,13% e 0,25% também apresentaram valores superiores ao controle, embora com menor intensidade.

Comportamento semelhante foi observado para a capacidade de troca catiônica. O solo controle apresentou valor de 83,96 mmolc/dm^3, enquanto os tratamentos com aplicação da casca de mamona mostraram aumento desse indicador, destacando-se novamente o tratamento sem queima (117,8 mmolc/dm^3) e o de 0,06% (118,39 mmolc/dm^3). Esses resultados indicam melhora na capacidade do solo de reter e disponibilizar nutrientes.

Em relação à saturação por bases, todos os tratamentos com aplicação do material apresentaram valores superiores ao solo controle, que registrou 76,18%. As maiores porcentagens foram observadas nos tratamentos de 0,13% (90,13%) e 0,25% (90,06%), seguidos pelo tratamento sem queima (88,04%) e pelo de 0,06% (84,53%). Esse aumento sugere melhoria nas condições de fertilidade química do solo.

De modo geral, os resultados indicam que tanto a casca de mamona calcinada quanto a aplicada sem queima contribuíram para o aumento da soma de bases, da capacidade de troca catiônica e da saturação por bases, evidenciando potencial para melhorar a fertilidade do solo. Além disso, observa-se que concentrações menores e o uso do material sem queima apresentaram resultados expressivos, indicando que diferentes formas de aplicação podem influenciar positivamente as propriedades químicas do solo.

Tabela 5 – Saturação por Base

Tratamentos	K %	Ca%	Mg %
0%	20,16	45,65	10,36
0,06%	44,88	31,92	7,74
0,13%	50,10	34,55	5,48
0,25%	64,19	22,20	3,67
Sem queima	41,29	37,13	9,62

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

Observa-se aumento expressivo da saturação por potássio nos tratamentos com aplicação do material. O solo controle apresentou 20,16%, enquanto os valores aumentaram progressivamente nas concentrações aplicadas, chegando a 64,19% no tratamento de 0,25%. O tratamento sem queima também apresentou valor elevado (41,29%), indicando que a casca de mamona contribui significativamente para o enriquecimento do solo com potássio.

Em contrapartida, a saturação por cálcio apresentou redução nos tratamentos com maiores concentrações do material. O controle registrou 45,65%, enquanto o menor valor foi observado no tratamento de 0,25% (22,20%). O tratamento sem queima manteve valor relativamente elevado (37,13%), mais próximo ao solo sem aplicação.

Para o magnésio, também foi observada tendência de diminuição nos tratamentos com maiores concentrações, passando de 10,36% no controle para 3,67% no tratamento de 0,25%. O tratamento sem queima apresentou valor intermediário (9,62%), indicando menor impacto na redução desse nutriente.

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação da casca de mamona promove aumento significativo da participação do potássio na saturação por bases do solo, enquanto cálcio e magnésio tendem a reduzir proporcionalmente à medida que a concentração aplicada aumenta.

Tabela 6 – Relações entre nutrientes

Tratamentos	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0%	4,40	2,26	0,51
0,06%	4,13	0,71	0,17
0,13%	6,30	0,69	0,11
0,25%	6,06	0,35	0,06
Sem queima	41,29	37,13	9,62

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise das relações entre nutrientes mostra alterações no equilíbrio entre cálcio, magnésio e potássio após a aplicação da casca de mamona. Observa-se que a relação Ca/Mg manteve valores próximos ao controle nos tratamentos de 0,06%, 0,13% e 0,25%, com leve aumento nas maiores concentrações.

Já as relações Ca/K e Mg/K apresentaram redução expressiva em todos os tratamentos com aplicação do material quando comparadas ao solo controle. Isso ocorre devido ao aumento da disponibilidade de potássio no solo, que altera a proporção entre esses nutrientes.

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação da casca de mamona tende a favorecer o potássio na dinâmica nutricional do solo, modificando o equilíbrio entre os cátions avaliados. O tratamento sem queima apresentou valores bastante elevados nas relações, indicando comportamento distinto em comparação aos demais tratamentos.

Tabela 7 – Matéria Orgânica e Carbono Total

Tratamentos	Mat. Orgânica (g/dm³)	Carbono Total (g/dm³)
0%	49,9	28,97
0,06%	52,2	30,28
0,13%	50,5	29,26
0,25%	52	30,14
Sem queima	58,7	34,07

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise da matéria orgânica e do carbono total indica que a aplicação da casca de mamona contribuiu para um leve aumento desses parâmetros em relação ao solo controle. O solo sem aplicação apresentou 49,9 g/dm^3 de matéria orgânica e 28,97 g/dm^3 de carbono total, enquanto os tratamentos com material calcinado mostraram valores ligeiramente superiores, com destaque para 0,06% e 0,25%, que apresentaram os maiores resultados entre esses tratamentos.

O tratamento sem queima apresentou os maiores valores observados, com 58,7 g/dm^3 de matéria orgânica e 34,07 g/dm^3 de carbono total, indicando maior aporte de material orgânico ao solo nessa condição.

De forma geral, os resultados sugerem que a incorporação da casca de mamona, especialmente sem queima, pode contribuir para o aumento do teor de matéria orgânica e do carbono no solo, fatores importantes para a melhoria da qualidade e da fertilidade do solo.

Tabela 8 – Textura do solo

Tratamentos	Areia (g/dm³)	Argila (g/dm³)	Silte (g/dm³)
0%	291	500	209
0,06%	330	463	207
0,13%	390	442	168
0,25%	378	462	160
Sem queima	302	445	253

Fonte: Elaborado com dados do Laboratório LabFert Análises.

A análise da textura do solo indica pequenas variações na proporção das frações granulométricas entre os tratamentos avaliados. No solo controle, observa-se predominância de argila (500 g/dm^3), seguida por areia (291 g/dm^3) e silte (209 g/dm^3), caracterizando um solo com textura mais argilosa.

Nos tratamentos com aplicação da casca de mamona calcinada, verificou-se aumento na fração de areia e redução da argila em comparação ao controle. O maior valor de areia foi observado no tratamento de 0,13% (390 g/dm^3), enquanto a argila apresentou redução

nesse mesmo tratamento (442 g/dm^3). O silte apresentou leve diminuição nos tratamentos com maiores concentrações, especialmente em 0,13% e 0,25%.

No tratamento sem queima, os valores indicaram aumento da fração de silte (253 g/dm^3) em relação aos demais tratamentos, enquanto areia e argila permaneceram em níveis intermediários.

De modo geral, os resultados mostram que, apesar de pequenas variações entre os tratamentos, a textura do solo manteve características próximas ao solo original, sem alterações estruturais significativas nas proporções das frações granulométricas. Essas mudanças podem estar associadas à incorporação do material orgânico e à heterogeneidade natural do solo analisado.

Durante o período experimental, observou-se um desenvolvimento mais acentuado das plantas de cebola (Allium cepa) nos vasos que receberam aplicação da casca de mamona moída e calcinada, quando comparados ao tratamento controle, sem adição do material. As plantas desses tratamentos apresentaram crescimento mais uniforme, com folhas mais vigorosas e melhor aspecto visual ao longo do acompanhamento.

Além disso, foi possível notar que alguns vasos com aplicação do material apresentaram menor presença de pragas e melhor condição geral das plantas. Esse comportamento sugere que a utilização da casca de mamona, especialmente após o processo de calcinação, pode atuar como condicionador do solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade e das condições de desenvolvimento das culturas.

Dessa forma, os resultados observados reforçam o potencial do aproveitamento da casca de mamona, um resíduo frequentemente encontrado e muitas vezes descartado em lotes urbanos e áreas abertas, como alternativa sustentável para uso agrícola e melhoria das condições do solo.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos ao longo do experimento, foi possível verificar que a utilização da casca de mamona, tanto calcinada quanto apenas moída, apresentou potencial para melhorar algumas propriedades químicas e físicas do solo. Os dados indicaram aumento na soma de bases, na capacidade de troca catiônica e na saturação por bases nos tratamentos com aplicação do material, demonstrando contribuição para a fertilidade do solo e maior capacidade de retenção e disponibilidade de nutrientes.

Também foi observado aumento nos teores de matéria orgânica e carbono total, especialmente no tratamento sem queima, evidenciando que a incorporação da biomassa pode favorecer o enriquecimento do solo e contribuir para a melhoria de sua qualidade. Além disso, verificou-se maior participação do potássio na saturação por bases nos tratamentos com casca de mamona, o que indica que o material pode atuar como fonte relevante desse nutriente.

Em relação à textura do solo, as variações observadas entre os tratamentos foram pequenas, mantendo características semelhantes ao solo original, o que sugere que a aplicação do material não promoveu alterações estruturais significativas na composição granulométrica, mas contribuiu principalmente para mudanças nas propriedades químicas e na dinâmica dos nutrientes.

No desenvolvimento das plantas de cebola (Allium cepa), foi possível observar crescimento mais uniforme e vigoroso nos vasos que receberam aplicação da casca de

mamona, reforçando a influência positiva do material nas condições de cultivo. Esses resultados indicam que o aproveitamento desse resíduo vegetal, frequentemente encontrado e muitas vezes descartado em lotes urbanos e áreas abertas, pode representar uma alternativa sustentável para o manejo de resíduos orgânicos e para a melhoria das condições do solo.

Dessa forma, o estudo demonstra que a valorização da casca de mamona por meio de processos como a pirólise para produção de biochar, ou mesmo sua aplicação moída, apresenta potencial agronômico e ambiental relevante. Além de contribuir para a fertilidade do solo, essa prática se alinha a estratégias de economia circular, incentivando o reaproveitamento de biomassa e a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. Além disso, abre caminho para novas pesquisas que possam aprofundar a avaliação do uso desse material em diferentes culturas, solos e condições de manejo.

REFERÊNCIAS

[1] RONQUIM, Carlos Cesar. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, **Embrapa** Monitoramento por Satélite, Campinas, SP, n. 8, nov. 2010. ISSN 1806-3322.

[2] MONTEIRO, J. E. B. de A. et al. Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). [s.l.]: **Embrapa Agricultura Digital**, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de- publicacoes/-/publicacao/1136438/zoneamento-agricola-de-risco-climatico-zarc

[3] Gomes H.; et al. Removal of Azoxystrobin and Deltamethrin from Water Using Activated Biochar from Moringa oleifera L. Wood: Synthesis, Characterization, and Adsorption Study. **Molecules**. 2025 Jun 26;30(13):2757. doi: 10.3390/molecules30132757. PMID: 40649275; PMCID: PMC12251124.

[4] YAMEEN, Muhammad Zubair; NAQVI, Salman Raza; JUCHELKOVÁ, Dagmar; KHAN, Muhammad Nouman Aslam. Harnessing the power of functionalized biochar: progress, challenges, and future perspectives in energy, water treatment, and environmental sustainability. ***Biochar***, v. 6, n. 25, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-024-00316-3.

[5] **Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima.** *Rumo à COP30*. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/rumo-a-cop-30. Acesso em: 16 ago. 2025.

[6] **Ministério do Meio Ambiente.** *Protocolo de Quioto*. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html. Acesso em: 16 ago. 2025.

[7] **PNUD BRASIL.** Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*, [s.d.]. Disponível em: https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel.

[8] SHOUDHO, Kishan Nandi; et al. Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals**. Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, [S.l.], v. 8, p. 100409, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100409

[9] Zhang Q, Masabni J, Niu G. Organic fertilizer type and dose affect growth, morphological and physiological parameters, and mineral nutrition of watermelon seedlings. **PeerJ**. 2024 Feb 21;12:e16902. doi: 10.7717/peerj.16902. PMID: 38406293; PMCID: PMC10893865.

[10] Qi JQ, Yuan HY, Sun SC, Zama EF, Tao BX, Liu J, Zhang BH. Biochar amendment alters rare microbial taxa and enhances wheat growth in alkaline farmland: insights into soil microbiome dynamics. **Front Microbiol**. 2025 May 21;16:1563712. doi: 10.3389/fmicb.2025.1563712. PMID: 40469741; PMCID: PMC12136494.

[11] Wang G, Kou L, Li C, Xu B, Wu Y. Enhanced Degradation of Phenol in Aqueous Solution via Persulfate Activation by Sulfur-Doped Biochar: Insights into Catalytic Mechanisms and Structural Properties. **Nanomaterials (Basel)**. 2025 Jun 24;15(13):979. doi: 10.3390/nano15130979. PMID: 40648687; PMCID: PMC12250925.

[12] ZAGO, V. C. P. ; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 219-228, mar./abr. 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376

[13] FERREIRA, Gilvan Barbosa. Adubação: correção de solo, nutrição mineral e adubação da mamoneira. **Embrapa**, 23 fev. 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/producao/tratos-culturais/adubacao.

Capítulo 5

Aplicação da glicerina pós-transesterificação na síntese de biopolímeros

Tatiana de Freitas Silva
Nathalia Vieira Barbosa
Luis Gustavo Ferreira Anastácio

Resumo: Em decorrência do aumento de resíduos plásticos derivados do petróleo em aterros sanitários, torna-se fundamental a utilização de insumos biodegradáveis que apresentam resistência uniforme mediante a incorporação de plastificantes. Atualmente, o processo mais difundido para a obtenção da glicerina utilizada na síntese de biopolímeros é a transesterificação alcalina, trata-se de uma reação na qual triglicerídeos reagem com um álcool na presença de um catalisador básico, gerando a glicerina residual como subproduto. Para a conformação desses materiais, aplica-se a técnica por *solvent casting*, um método que realiza a síntese de filmes finos por meio da modelagem por espalhamento homogêneo e evaporação, resultando no chamado amido termoplástico (TPS). O procedimento experimental para a obtenção deste polímero apresenta um tempo de reação de 30 minutos sob agitação mecânica de 200 rpm e temperatura controlada de 45 °C. O processo de síntese d apresentou um rendimento de 57,00%, demonstrando ser um método reacional eficiente. O plástico de amido é classificado como um produto de fonte renovável, pertencente à classe dos polímeros naturais modificados e pautado nos princípios da química verde.

Palavras-chave: Glicerina, Plastificante, Sustentabilidade.

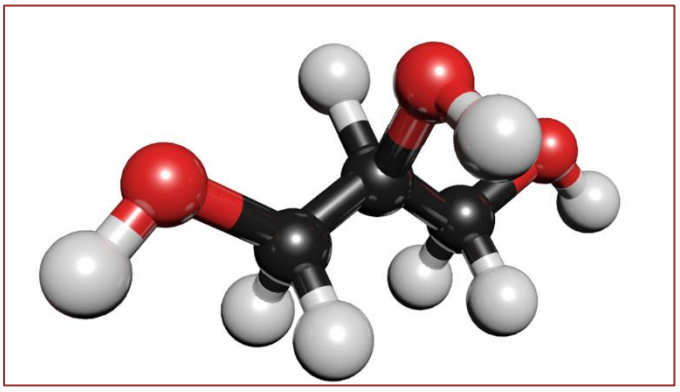
1. INTRODUÇÃO

1.1. A GLICERINA RESIDUAL COMO AGENTE SUSTENTÁVEL

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas aos plásticos convencionais. Nesse cenário, os biopolímeros surgem como uma solução promissora, especialmente aqueles produzidos a partir de subprodutos da indústria de biocombustíveis. Um exemplo notável é o aproveitamento da glicerina bruta, produto gerado durante o processo de transesterificação na produção de biodiesel. Devido à sua alta disponibilidade e baixo custo, a glicerina torna-se uma matéria-prima atrativa para a formulação de filmes, contribuindo para a valorização de resíduos e o fortalecimento da economia circular.

A glicerina ($C_3H_8O_3$) apresenta propriedades físico-químicas que favorecem sua utilização na síntese de bioplásticos, tais como viscosidade, capacidade de formar ligações de hidrogênio e elevado teor de grupos hidroxila. Essas características possibilitam a obtenção de materiais flexíveis quando o plastificante é combinado com polímeros naturais, como o amido. Nessa reação, a glicerina atua como aditivo, conferindo maior maleabilidade e resistência à quebra, ampliando suas possíveis aplicações, especialmente na fabricação de embalagens de curta vida útil (Guimarães et al., 2007).

Figura 1: Estrutura ideal da Glicerina ($C_3H_8O_3$)



Fonte: Tubosquid, 2026.

Entretanto, é fundamental considerar que a glicerina bruta pode conter sais, etanol e ácidos graxos residuais. Assim, etapas de controle de qualidade tornam-se indispensáveis no processo pós-produtivo de materiais poliméricos. A glicerina, aliada à escolha correta dos plásticos biodegradáveis e à otimização das condições de processamento, permite a obtenção de filmes com desempenho competitivo em relação aos produtos sintéticos derivados do petróleo (Moro et al., 2013).

Dessa forma, o uso deste plastificante proveniente da transesterificação configura-se como uma estratégia sustentável, pois essa abordagem alia o reaproveitamento de resíduos à necessidade crescente por insumos menos agressivos ao meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte de subprodutos industriais e promovendo a inovação tecnológica na área dos biomateriais. Segundo Olanyk et al. (2018), o investimento em pesquisas e tecnologias voltadas ao aproveitamento eficiente da glicerina pode representar um importante avanço para a indústria e para a sustentabilidade global.

1.2. O PLASTIFICANTE APLICADO NA TÉCNICA *SOLVENT CASTING*

A aplicação de materiais poliméricos naturais com o amido ainda é limitada por suas propriedades mecânicas, especialmente sua elevada rigidez e fragilidade, o que torna necessária a incorporação de agentes capazes de melhorar sua processabilidade. Dentre os plastificantes utilizados, a glicerina tem recebido atenção significativa, sobretudo quando sintetizada como subproduto da produção de biodiesel via transesterificação.

Nesse contexto, a glicerina residual apresenta elevada disponibilidade e baixo custo, configurando-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável. Do ponto de vista químico, sua estrutura rica em grupos hidroxila favorece a formação de ligações de hidrogênio com cadeias poliméricas, promovendo o aumento da mobilidade molecular e, consequentemente, a redução da rigidez do material (Guimarães et al., 2007; Moro et al., 2013).

O mecanismo deste produto residual está diretamente relacionado à sua capacidade de se interpor entre as cadeias do polímero, reduzindo as forças intermoleculares e aumentando o volume livre do sistema. Esse efeito resulta em materiais mais flexíveis e menos suscetíveis à fratura, embora possa impactar propriedades como resistência mecânica e absorção de água. Segundo Olanyk et al. (2018), o equilíbrio entre flexibilidade e estabilidade estrutural depende diretamente da concentração de plastificante e da pureza da glicerina utilizada, sendo este um fator crítico no desempenho final do bioplástico.

Para a obtenção desses materiais, a técnica de *solvent casting* tem sido amplamente empregada devido à sua simplicidade e eficiência na formação de filmes poliméricos. Esse método consiste na solubilização do polímero em um solvente adequado, seguida da adição do plastificante e posterior evaporação do solvente, resultando na formação de um filme contínuo e homogêneo. De acordo com Moro et al. (2013), o controle de variáveis como temperatura, tempo de secagem e proporção dos componentes é essencial para garantir a uniformidade estrutural e as propriedades desejadas do material final.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A preocupação ambiental pela busca por materiais biodegradáveis no cenário nacional tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento de substratos orgânicos na produção de bioplásticos com base em amido (Guimarães, 2007). Nesse contexto, segundo Moro (2013), a glicerina, subproduto da transesterificação no processo de fabricação de biodiesel, apresenta-se como uma matéria-prima abundante e econômica para essa finalidade, sendo mais eficiente que a goma de xantana.

Do ponto de vista químico, a alta concentração de grupos hidroxila, favorecem sua interação com polímeros naturais, possibilitando a obtenção de materiais flexíveis e biodegradáveis (Olanyk, 2018). Desse modo, a produção de peças com bioplásticos integra educação, sustentabilidade e inovação tecnológica (Moro, 2013).

Dessa maneira, o uso de bioplásticos produzidos a partir desses resíduos contribui diretamente para a economia circular, promovendo a valorização de subprodutos que seriam descartados (Gomes, 2022). Além disso, a fabricação de sacolas sustentáveis utilizando bioplásticos reforça o compromisso social e ambiental, oferecendo alternativas seguras para o desenvolvimento infantil (Gomes, 2022). Segundo Nascimento (2015), os

recipientes que podem sofrer compostagem têm grande relevância educacional por estimular o raciocínio crítico, a concentração e a tomada de decisões.

Essa prática não apenas reduz o impacto ambiental associado ao uso de plásticos convencionais, mas também contribui para a sensibilização sobre a importância do consumo consciente (Barbosa, 2021). Para isso, é fundamental controlar etapas do processo, como a purificação da glicerina e a homogeneização da mistura para garantir a qualidade do bioplástico (Lima, 2019). A aplicação da glicerina como plastificante é essencial para conferir maleabilidade ao plástico, evitando fragilidades e aumentando sua durabilidade (Gomes, 2022).

Nesse sentido, a caracterização física e química dos bioplásticos deve ser realizada para avaliar propriedades como resistência mecânica, biodegradabilidade e estabilidade térmica (Guimarães, 2007). Investimentos em pesquisa e desenvolvimento possibilitam a otimização dos processos e a ampliação das aplicações desses materiais (Moro, 2013). O desenvolvimento de bioplásticos sustentáveis está alinhado às políticas ambientais que incentivam a redução de resíduos e o uso racional de recursos naturais (Olanyk, 2018).

Assim, a combinação entre ciência dos materiais e educação ambiental fortalece projetos sociais promovendo a informação como ferramenta pedagógica (Marques, 2021). A conscientização desde a infância sobre sustentabilidade tem impacto positivo no comportamento de consumo futuro (Carreira, 2020). No âmbito tecnológico, o aperfeiçoamento das técnicas de moldagem e processamento é fundamental para garantir a competitividade dos bioplásticos frente aos polímeros sintéticos (Nascimento, 2015).

A fabricação de sacolas com bioplásticos reaproveita subprodutos industriais, reduzindo a geração de resíduos e promovendo o desenvolvimento sustentável (Costa, 2015). Por fim, a integração entre produção, educação e meio ambiente demonstra o potencial dos bioplásticos na construção de uma sociedade mais consciente e sustentável (Barbosa, 2021).

3.METODOLOGIA

3.1. PREPARAÇÃO DO CATALISADOR:

O catalisador utilizado na reação de transesterificação foi o óxido de cálcio (CaO), obtido a partir da calcinação de cascas de ovos. Este processo consiste na decomposição térmica do carbonato de cálcio, principal constituinte da biomassa, conforme a equação:

Figura 2: Decomposição do carbonato de cálcio

$$CaCO_{3(s)} \xrightarrow{\text{calor}} CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

Fonte: Os autores, 2026.

Na etapa de calcinação, foi explorada a faixa de temperatura entre 600 °C e 950 °C em forno mufla. Desse modo, o tempo de aquecimento variou de 2,5 a 3 horas até o patamar desejado. Com base nos testes, estabeleceu a temperatura de 900 °C e o tempo de

permanência de 2,5 horas como condições para a obtenção do óxido de cálcio como um catalisador eficiente.

Figuras 3 e 4: Transformação da casca de ovo em catalisador alcalino

Fonte: Os autores, 2026.

3.2. A SÍNTESE DO PLÁSTICO SUSTENTÁVEL:

Paralelamente, o óleo de cozinha residual foi submetido a três etapas de filtração utilizando coador de café com pano novo, com a finalidade de remover impurezas sólidas e garantir maior eficiência na etapa reacional.

A obtenção da glicerina bruta foi realizada por meio da reação de transesterificação alcalina do óleo residual, utilizando etanol em excesso com intuito de maximizar a conversão em subprodutos e óxido de cálcio como catalisador, na proporção de 2,5% em relação a massa do óleo. A razão molar etanol:óleo foi mantida em 9:1, de modo a favorecer a conversão dos reagentes, especialmente em função da variabilidade da matéria-prima residual. Inicialmente, o catalisador foi disperso no etanol e, posteriormente, essa solução foi adicionada ao óleo, promovendo melhor interação entre as fases reacionais.

A reação para obter a glicerina foi conduzida em reator batelada encamisado, sob agitação constante de 100 rpm (rotações por minuto) e um fluxo de água contínuo dentro do reator na temperatura controlada de 45 °C, durante 45 minutos. Após o término da reação, a mistura foi transferida para funil de separação, permanecendo em repouso por 24 horas para a separação das fases. A fração superior correspondeu ao biocombustível, enquanto a fase inferior correspondeu a glicerina bruta, sendo separadas por decantação.

Figura 5: Reação de transesterificação alcalina em um reator encamisado

Fonte: Os autores, 2026.

Figura 6: Decantação dos subprodutos da reação alcalina, glicerina bruta em baixo e biodiesel em cima

Fonte: Os autores, 2026.

Para a produção do bioplástico, foram dispersos 5,00 g de amido de milho em 25 mL de água destilada em béquer de 250 mL, com adição de 5,00 mL de ácido acético. A mistura reacional foi aquecida a 45 °C sob agitação mecânica de 200 rpm até a completa gelatinização do amido, formando um sistema homogêneo. Após a estabilização do meio, foram adicionados 10,00 g de glicerina bruta oriunda da decantação, atuando como plastificante, mantendo-se a agitação por 30 minutos para assegurar a homogeneização da solução filmogênica, deixando esfriar por 5 minutos após a síntese.

Figura 7: Utilização da técnica *Solvent Casting* para obtenção do bioplástico

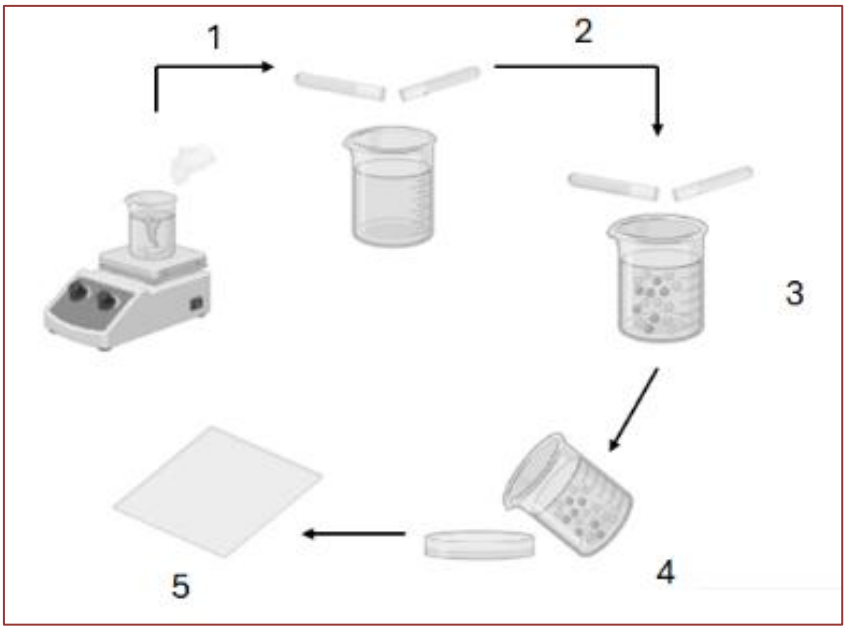
Fonte: Os autores, 2026.

Por fim, a solução viscosa foi vertida em moldes e submetida à secagem em estufa a 27 °C por 24 horas. Esse processo promoveu a evaporação da água e a consequente formação do filme polimérico, resultando na obtenção de bioplástico à base de amido, com incorporação de glicerina bruta como principal agente plastificante, um material resistente e sustentável.

3.3. REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO *SOLVENT CASTING* NESSE TRABALHO

A obtenção do plástico ecológico se dá por meio de:

Figura 8: Representação da síntese via Solvent Casting



Fonte: Os autores, 2026.

Temos:

1: Adição de amido e água (gelatinização)

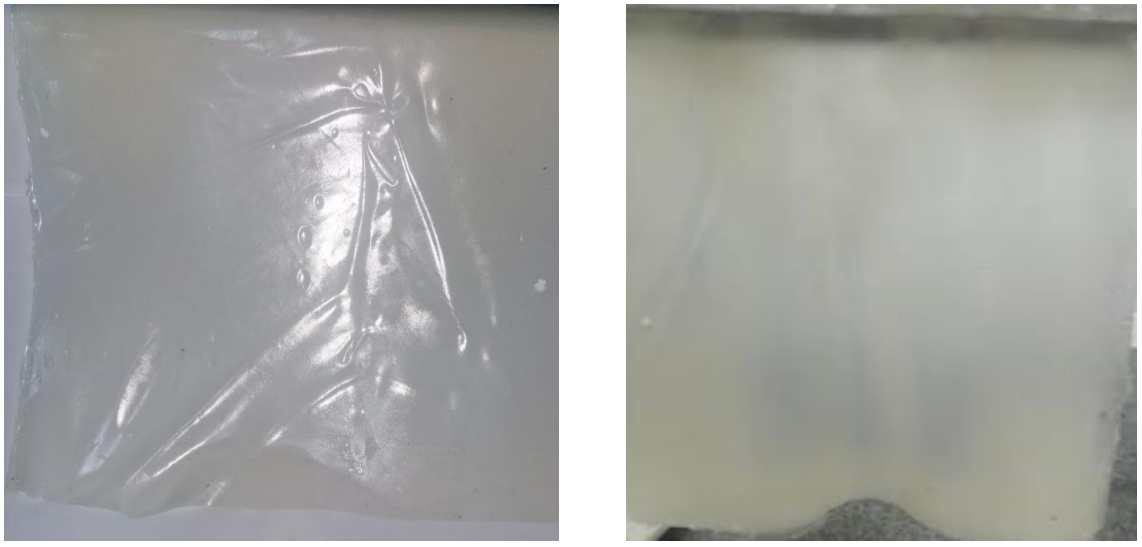
2: Adição de ácido acético glacial

3: Adição de glicerina

4: Adição da amostra em um molde

5: Filme plástico após secagem.

Figuras 9 e 10: Filmes bioplásticos após secagem



Fonte: Os autores, 2026.

4. RESULTADOS

4.1. AVALIAÇÃO REOLÓGICA DO COMPORTAMENTO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA DA GLICERINA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Este trabalho analisou o comportamento reológico da glicerina, subproduto da transesterificação alcalina, utilizando um Viscosímetro Saybolt Universal conforme a norma ASTM D88.

Figura 11: Ensaio de viscosidade cinemática utilizando um Viscosímetro Saybolt Universal

Fonte: Os autores, 2026.

As informações do ensaio apresentado a seguir na tabela 1 consiste na mensuração do tempo de escoamento de 60 mL do fluido sob temperaturas controladas, com resultados expressos em Segundos Saybolt Universal (SSU). O ensaio constatou que a viscosidade da glicerina bruta é consideravelmente demorada, então os valores obtidos foram convertidos de segundos para minutos para haver coerência nos resultados.

Conversão:

1 cP (Centipoise) = 1 cSt (Centistoke) x Densidade.

1 centiStokes (cSt) = 1 mm^2/s

Pode-se calcular a equivalência SSU em cSt, pela expressão empírica:

$$cSt\ (centiStokes) = 0{,}220 \times SSU - \frac{135}{SSU}$$

O procedimento experimental foi realizado em diversas etapas térmicas, cronometrando-se o intervalo exato entre o início do fluxo e o momento em que o fluido atinge o menisco do copo receptor. A partir dos tempos obtidos, a viscosidade cinemática foi calculada e convertida para centiStokes (cSt). Essa metodologia permitiu avaliar a influência da temperatura sobre a viscosidade e verificar a compatibilidade da glicerina com o modelo de fluido newtoniano, garantindo a precisão e a confiabilidade dos dados.

Assim:

t = tempo (min.)

Temperatura (°C)

Viscosidade cinemática (cSt)

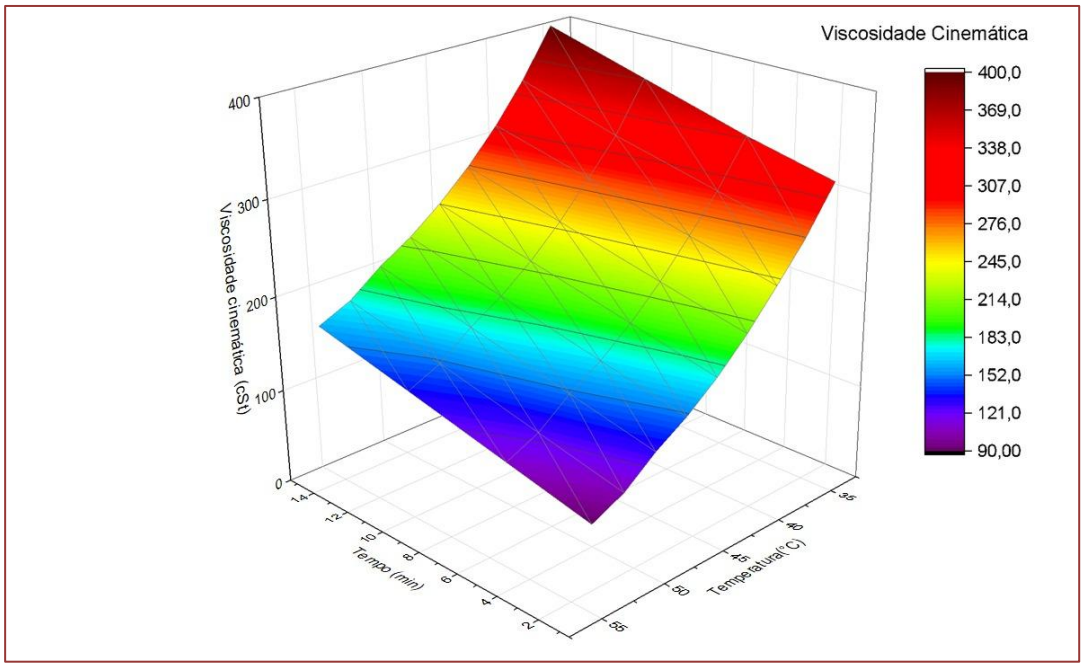
Tabela 1: Valores de viscosidade da glicerina bruta obtidos em diferentes condições de temperatura e tempo

Temperatura (°C)	t=0 min.	t=5 min.	t=10 min.	t=15 min.
35,00	320 cSt	340 cSt	370 cSt	400 cSt
37,50	275 cSt	295 cSt	320 cSt	350 cSt
40,00	240 cSt	260 cSt	285 cSt	310 cSt
42,50	205 cSt	225 cSt	250 cSt	275 cSt
45,00	175 cSt	195 cSt	220 cSt	245 cSt
47,50	150 cSt	170 cSt	195 cSt	220 cSt
50,00	130 cSt	150 cSt	175 cSt	200 cSt
52,50	105 cSt	125 cSt	150 cSt	175 cSt
55,00	90 cSt	110 cSt	135 cSt	160 cSt

Fonte: Os autores, 2026.

De acordo com Olanyk et al. (2018) a viscosidade cinemática da glicerina bruta é menor em relação à glicerina pura para análise (PA), devido à presença de água e outras impurezas na amostra. Ao analisar a Tabela 1 e o Gráfico 1 nota-se ainda que quanto maior a temperatura o fluido se torna menos viscoso, um comportamento que se mantém ao longo do tempo de aquecimento se assemelhando com as características reológicas de um fluido newtoniano, mesmo com impurezas como os resquícios de catalisador e etanol que torna sua viscosidade cinemática relativamente menor que a glicerina purificada.

Gráfico 1: Avaliação reológica do comportamento da viscosidade cinemática da glicerina em função da temperatura

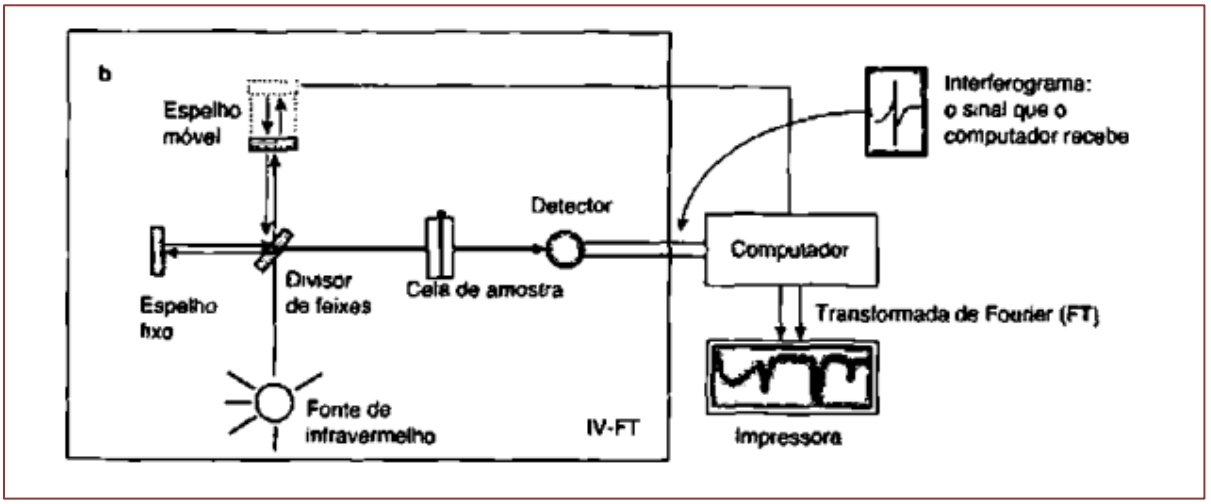


Fonte: Os autores, 2026.

4.2. ANÁLISE VIA ESPECTROFOTÔMETRO (FTIR)

Neste trabalho foi realizada a análise por espectrofotometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) operada no modo de refletância total atenuada (ATR), assim, permitiu a identificação dos grupos funcionais característicos da matriz do bioplástico. Essa técnica pode separar as frequências das absorções individuais contidas no interferograma, produzindo um espectro virtualmente idêntico ao obtido com um espectrômetro dispersivo.

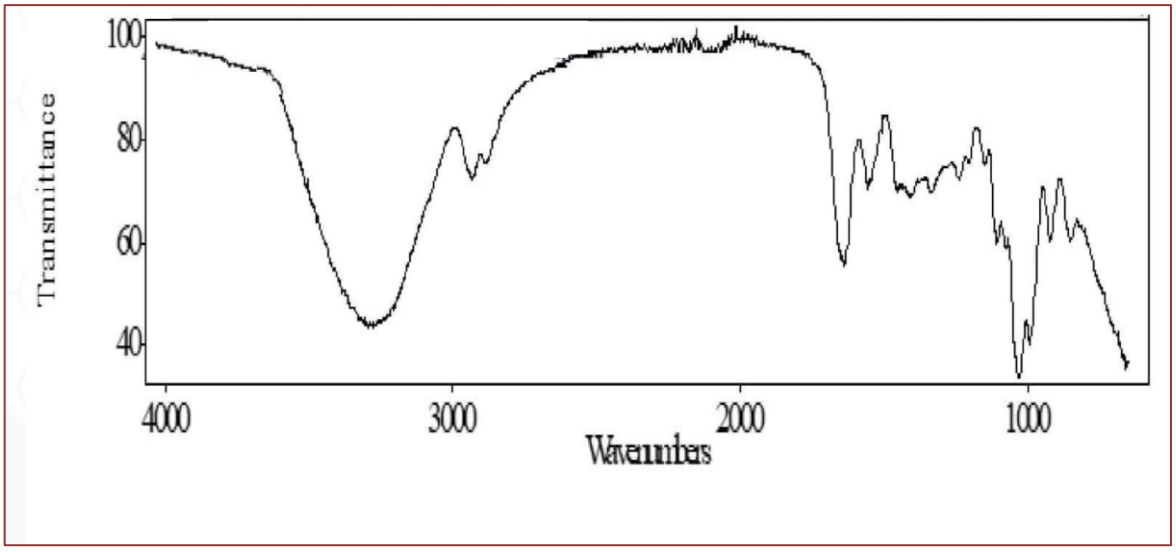
Figura 12 : Diagrama esquemático de espectrofotômetro de transformada de Fourier



Fonte: Pavia et. al., 2010.

Observou-se uma banda larga e intensa na região entre 3200–3500 cm^{-1}, atribuída às vibrações de estiramento das hidroxilas (O–H). De acordo com Pavia et. al (2010), essa largura de banda é resultante da formação de redes de ligações de hidrogênio intermoleculares, típicas de sistemas ricos em polissacarídeos (amido).

Figura 13 : Análise via espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (ATR-FTIR)



Fonte: Os autores, 2026.

Na região do espectro entre 1000–1200 cm^{-1}, foram identificadas vibrações de estiramento C–O que são inerentes à estrutura piranosídica do amido e às cadeias carbônicas do glicerol. Desse modo, é importante citar as absorções na região de 1700 cm^{-1} pois é um dado relevante, assim, confirma a existência de grupos carbonila (C=O),

isso indica a presença típica de ácido acético e ácidos graxos, comportamento de um ácido carboxílico.

4.3. DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA ÚTIL DO FILME PLÁSTICO

A espessura em milímetros (mm) do filme bioplástico foi determinada por meio de micrômetro centesimal que faz leitura de 0 a 25 milímetros, com resolução de 0,01 (mm), sendo realizadas medições em diferentes pontos ao longo da superfície de cada amostra, a fim de reduzir possíveis variações decorrentes da não uniformidade do material. Para isso, amostras do material foram preparadas com 2,5 cm^2 e submetidas à leitura cuidadosa, evitando compressão excessiva do material durante a medição.

Figura 14: Dimensionamento de espessura útil do filme plástico

Fonte: Os autores, 2026.

A leitura da bainha do micrômetro descreveu uma espessura de 0,12 mm e confirmou uma característica típica de materiais poliméricos obtidos por técnicas por *solvent casting*, a espessura reduzida, onde apresentam maior flexibilidade e transparência, porém podem apresentar limitações quanto à resistência mecânica e maior suscetibilidade à ruptura. Além disso, a espessura influencia diretamente propriedades de barreira, como a permeabilidade ao vapor de água, sendo um parâmetro essencial na definição das aplicações do material. Dessa forma, os valores obtidos neste estudo estão em consonância com o comportamento esperado para bioplásticos, evidenciando a importância do controle da espessura na obtenção de materiais com desempenho adequado.

4.4. RENDIMENTO DE GLICERINA BRUTA POR MEIO DA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

Houve uma conversão considerável de glicerina bruta no processo, sendo:

Rendimento (%) = massa de glicerina bruta (gramas) x 100
massa de gordura vegetal (gramas)

Rendimento (%) = 285,00 x 100
500,00

Rendimento (%) = 57,00%

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que a incorporação da glicerina atuou de forma eficiente como agente plastificante, promovendo maior flexibilidade ao material e reduzindo sua rigidez natural, característica típica de polímeros amiláceos não modificados. Do ponto de vista físico, a espessura reduzida do filme obtido contribuiu diretamente para propriedades como transparência e maleabilidade, aspectos desejáveis em aplicações que exigem adaptação a diferentes formatos e superfícies. Embora filmes mais finos possam apresentar limitações em termos de resistência mecânica, os resultados indicam que o material produzido possui características adequadas para aplicações de curta duração, especialmente quando associado a condições controladas de uso. Além disso, o comportamento reológico da glicerina, influenciado pela temperatura, demonstrou coerência com sistemas newtonianos na lei dos fluidos, reforçando a previsibilidade do processo e a reprodutibilidade do material obtido.

Sob a perspectiva ambiental, o uso da glicerina bruta, sem etapas de purificação, destaca-se como um diferencial importante, pois reduz custos operacionais e valoriza um subproduto amplamente disponível na indústria de biodiesel que regularmente é descartado. Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos e contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado de materiais. Dessa forma, o bioplástico desenvolvido configura-se como uma alternativa sustentável aos polímeros convencionais derivados do petróleo.

Em termos de aplicação, o material produzido apresenta potencial significativo para a fabricação de embalagens biodegradáveis, com destaque em sacolas plásticas destinadas ao acondicionamento e à preservação de alimentos. Sua flexibilidade, leveza e capacidade de formação de filmes contínuos o tornam adequado para uso em embalagens de curta vida útil, contribuindo para a conservação de produtos e redução do uso de plásticos sintéticos. Assim, o bioplástico desenvolvido neste estudo demonstra não apenas viabilidade técnica, mas também relevância ambiental e funcional, podendo ser explorado em diferentes contextos industriais e posteriormente ser integralmente devolvido ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho agradece à empresa Solutech Análises Clínicas pela valiosa parceria estabelecida e pela gentil realização, a título de cortesia, das análises referentes aos relatórios de ensaio nº D0127.26-01, D0127.26-02, D0127.26-03 e D0127.26-04. Os ensaios foram conduzidos por meio da técnica de espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (ATR-FTIR), incluindo a avaliação de correlação/similaridade espectral, foram fundamentais para a obtenção de resultados consistentes e para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS:

[1] BARBOSA, L. C. **Consumo consciente e práticas sustentáveis na infância. Revista Interdisciplinar de Estudos Ambientais**, v. 5, n. 2, p. 102–110, 2021.

[2] CARREIRA, M. E. **Desenvolvimento de sacolas sustentáveis com bioplásticos. Tecnologia & Sociedade**, v. 18, n. 4, p. 45–53, 2020.

[3] COSTA, E. F. **Síntese e caracterização de filmes à base de amido e glicerol com adição de argilominerais**. 2015. Londrina, 2015.

[4] GOMES, F. R. **Efeitos da glicerina nas propriedades mecânicas de bioplásticos. Revista de Ciência dos Materiais**, v. 12, n. 3, p. 121–129, 2022.

[5] GUIMARÃES, J. R. **Preparação e caracterização de compósitos de amido plastificado com glicerol e reforçados com fibras naturais vegetais**. 2010.

[6] GUIMARÃES, J. R. **Bioplásticos à base de amido: potencialidades e desafios. Revista Brasileira de Biotecnologia,** v. 22, n. 2, p. 45–53, 2007.

[7] LIMA, S. T. **Processos de purificação da glicerina para aplicação em biopolímeros. Revista Brasileira de Engenharia Química,** v. 40, n. 1, p. 77–84, 2019.

[8] MARQUES, D. L. **Valorização de resíduos na produção de materiais sustentáveis. Revista de Sustentabilidade e Inovação,** v. 7, n. 1, p. 33–41, 2021.

[9] MORO, T. D. A. et al. **Efeito plastificante do glicerol nas propriedades físicas de bioplásticos de amidos e maracujá.** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2013.

[10] NASCIMENTO, R. F. **Sacolas de biopolímeros como instrumento pedagógico. Revista Educação em Foco**, v. 10, n. 1, p. 59–67, 2015.

[11] OLANYK, L. Z. **Desenvolvimento de polímero termoplástico de glicerina para aplicação na manufatura aditiva por extrusão de material**. Curitiba, 2018.

[12] PAVIA, Donald L.; LAMPMAN, Gary M.; KRIZ, George S.; VYVYAN, James R. **Introdução à espectroscopia**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

[13] TUBOSQUID, 2026. **Disponível em: https://www.turbosquid.com/pt_br/.** Acesso em: 22/03/2026

Capítulo 6

Corrosão em ambientes refrigerados: análise de casos e seus impactos na indústria de alimentos

Bruno Silva Sacramento
Fernando Nunes da Silva

Resumo: O objetivo deste estudo é investigar os impactos da corrosão em ambientes de baixa temperatura na indústria de alimentos, especialmente em frigoríficos. A pesquisa busca responder: como a corrosão afeta a operação industrial e quais materiais são mais adequados para minimizar seus efeitos? A metodologia incluiu revisão bibliográfica e estudo de caso em um frigorífico, com análise visual de equipamentos corroídos. Os resultados apontam que a umidade e substâncias químicas aceleram a corrosão, afetando a durabilidade dos equipamentos e a segurança alimentar. A adoção de materiais resistentes, inspeções regulares e novas técnicas de soldagem são essenciais para mitigar esses impactos.

Palavras-chave: Degradação dos materiais, Ambientes refrigerados, Manutenção industrial, Frigorífico, Segurança alimentar.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno natural de degradação de materiais metálicos que impacta diversos setores industriais, incluindo a indústria de alimentos, especialmente em ambientes de baixa temperatura. A exposição constante dos equipamentos a agentes químicos, umidade e variações térmicas cria um ambiente propício para a corrosão, comprometendo a integridade estrutural dos materiais, a eficiência operacional e a segurança alimentar. No contexto industrial, a corrosão não apenas reduz a vida útil dos equipamentos, aumentando os custos de manutenção e substituição, mas também representa um risco à qualidade dos produtos alimentícios, podendo levar à contaminação química e microbiológica (Póvoa, 2017).

Na indústria de alimentos, a escolha adequada dos materiais para fabricação de equipamentos é fundamental para garantir durabilidade e evitar riscos sanitários. O aço inoxidável é amplamente utilizado devido à sua alta resistência à corrosão, especialmente em ambientes que exigem rigorosos padrões de higiene. No entanto, mesmo materiais considerados resistentes podem sofrer processos corrosivos quando submetidos a condições severas, como a presença de cloretos e baixas temperaturas, que favorecem fenômenos como corrosão galvânica e por pites (De Souza, 2024). Além do aço inoxidável, outros metais, como o aço e ligas metálicas de alta resistência, são empregados na indústria, mas frequentemente enfrentam desafios significativos ao serem expostos a ambientes agressivos.

A corrosão em equipamentos industriais pode comprometer a qualidade e segurança dos alimentos ao liberar partículas metálicas e resíduos. Para mitigar esses riscos, a *Brand Reputation Compliance Global Standards* (BRCGS) definiu normas como a BRCGS *Food Safety, que* estabelecem diretrizes para a integridade estrutural, recomendando o uso de materiais resistentes à corrosão, boas práticas de fabricação (BPF) e inspeções periódicas (BRCGS, 2022).

No Brasil, a Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) 498/2021 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) define critérios para a composição e migração de substâncias dos materiais metálicos na indústria de alimentos, prevenindo a contaminação. Assim, a análise da corrosão em baixa temperatura é essencial para mitigar impactos e garantir a segurança alimentar (ANVISA, 2021).

Diante desse cenário, o presente estudo busca responder à seguinte questão: como a corrosão em ambientes de baixa temperatura impacta a operação da indústria de alimentos e qual a influência dos materiais utilizados nos equipamentos nesse processo? Essa investigação é fundamental, uma vez que a corrosão pode resultar em custos elevados com manutenção corretiva e substituição de equipamentos, além de comprometer a qualidade do produto final e a conformidade com normas sanitárias e de segurança.

Partindo dessa problemática, algumas hipóteses são levantadas. Primeiramente, é possível supor que a seleção inadequada de materiais em condições de baixa temperatura acelere os processos corrosivos. Além disso, considera-se que a aplicação de técnicas de proteção, como revestimentos anticorrosivos e o uso de materiais de alta resistência, pode minimizar os efeitos da corrosão (Pereira, 2019).

A relevância deste estudo está em assegurar eficiência e segurança nos processos da indústria alimentícia. A corrosão, além de gerar impactos financeiros expressivos, pode comprometer a qualidade e a segurança dos alimentos processados, afetando diretamente

a saúde dos consumidores. Dessa forma, este trabalho busca não apenas contribuir para o aprimoramento das práticas industriais, mas também expandir o conhecimento científico sobre os efeitos da corrosão em ambientes específicos.

O objetivo geral deste trabalho é investigar os impactos da corrosão na indústria de alimentos, com foco nos ambientes refrigerados. Os objetivos específicos são: (1) analisar os fatores que contribuem para a corrosão nos materiais utilizados na indústria de alimentos; (2) avaliar os métodos de proteção contra corrosão em ambientes refrigerados; e (3) identificar soluções tecnológicas e materiais alternativos que possam aumentar a durabilidade dos equipamentos.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem qualitativa e quantitativa, caracterizada por ser exploratória e descritiva, seguindo os preceitos de que a pesquisa exploratória busca proporcionar maior familiaridade com o problema para torná-lo explícito (Gil, 2002). O estudo foi dividido em duas partes principais: uma revisão bibliográfica e um estudo de caso. A pesquisa bibliográfica teve como objetivo identificar e analisar o conhecimento consolidado sobre corrosão em ambientes de baixa temperatura, com foco no setor alimentício, visando compreender os impactos desse fenômeno nos equipamentos e nos processos industriais relacionados. A segunda etapa envolveu a análise de casos práticos de corrosão em uma indústria alimentícia do setor de abate bovino, por meio de avaliação visual, utilizando fotografias para registrar os danos nos equipamentos, além do levantamento de dados que ilustram os efeitos corrosivos identificados.

Para a revisão bibliográfica, foram consultados artigos científicos, teses, dissertações e trabalhos acadêmicos que abordam o tema da corrosão em diferentes ambientes e materiais, com foco especial em ambientes de baixa temperatura. A pesquisa bibliográfica permite o desenvolvimento teórico necessário para fundamentar estudos empíricos e compreender o estado da arte de um determinado campo de estudo (Marconi; Lakatos, 2019). A busca pelos documentos foi realizada em bases de dados reconhecidas, como Scopus, Google Scholar e ScienceDirect, utilizando os seguintes operadores booleanos: “AND”, “OR” e “NOT”. As palavras-chave empregadas foram, por exemplo, “corrosão”, “indústria de alimentos”, “baixa temperatura”, “equipamentos industriais” e “materiais resistentes à corrosão”.

Os critérios de inclusão dos materiais de pesquisa envolveram a seleção de artigos e estudos publicados entre 2002 e 2024, com foco em publicações recentes que discutem avanços tecnológicos e novas descobertas sobre a corrosão em ambientes específicos. Para enriquecer o estudo, foram incluídos trabalhos que abordam o desempenho de materiais como aços inoxidáveis, aço carbono e materiais resistentes à corrosão em ambientes refrigerados, assim como métodos de prevenção da corrosão nesses contextos.

O estudo de caso foi conduzido em um frigorífico para abate bovino na região amazônica, onde foram documentados diversos exemplos de corrosão em ambientes refrigerados. Fotografias dos equipamentos corroídos foram tiradas para serem apresentadas ao longo do trabalho, ilustrando os danos causados pela corrosão em ambientes de baixa temperatura. O uso de imagens é uma estratégia recomendada para dar maior tangibilidade aos estudos de caso e proporcionar uma melhor compreensão do fenômeno investigado (Gil, 2002).

As imagens obtidas permitiram uma análise mais detalhada dos materiais utilizados nos equipamentos, bem como das condições operacionais específicas às quais estavam submetidos. Esse procedimento se justifica pela abordagem que destaca a importância de coletar dados diretamente da fonte para a validação de hipóteses e o enriquecimento do estudo (Marconi; Lakatos, 2019). A combinação da pesquisa bibliográfica com o estudo de caso permitiu uma análise abrangente do tema, identificando tanto os aspectos teóricos quanto as implicações práticas da corrosão na indústria de abate bovino.

A coleta e análise dos dados seguiram um protocolo sistemático, no qual foram analisados cerca de 16 artigos científicos e estudos de caso. Além disso, foram utilizadas informações da literatura sobre a corrosão e suas implicações no desempenho de materiais em ambientes de baixa temperatura. A integração de dados teóricos e práticos forneceu uma base sólida para as discussões e análises subsequentes, mostrando como a corrosão pode comprometer a eficiência operacional e a segurança na indústria de alimentos.

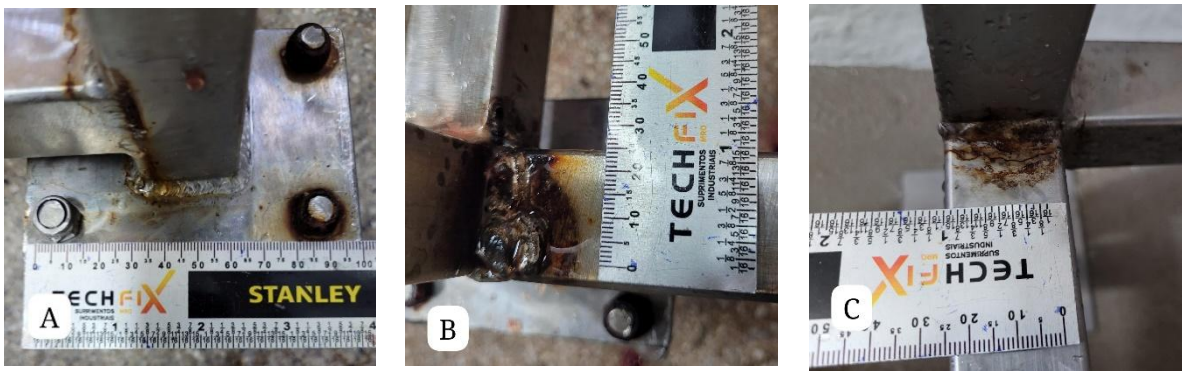
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A corrosão em ambientes industriais refrigerados, como frigoríficos, é uma preocupação constante, dado seu impacto direto na integridade estrutural e na segurança alimentar. A exposição contínua a umidade, substâncias químicas de higienização e materiais alimentares cria um ambiente favorável à degradação de componentes metálicos. Nesse contexto, são apresentados a seguir registros fotográficos de corrosão observada em componentes específicos de um frigorífico, como: suporte para bandeja plástica, estrutura de nória[1], painéis isotérmicos e conexões hidráulicas com válvulas esféricas. Evidenciando como esses fenômenos podem comprometer as instalações, desde pontos de solda até áreas de maior desgaste por oxidação. O estudo desses casos específicos é essencial para entender as causas e os efeitos da corrosão no setor alimentício.

As imagens analisadas revelam detalhes importantes sobre a degradação de materiais, com destaque para a corrosão galvânica e por pites, típicas de ambientes refrigerados e alta umidade. Através dessas ilustrações, será possível discutir não apenas os aspectos técnicos envolvidos, mas também as consequências práticas para a manutenção e operação dos equipamentos. Esses exemplos visuais servirão como base para uma discussão mais ampla sobre a importância de estratégias preventivas, como o uso de materiais mais resistentes e a implementação de inspeções regulares, a fim de prolongar a vida útil das estruturas e garantir a segurança nos processos industriais.

[1] Nória é um sistema de transporte contínuo utilizado em frigoríficos para a movimentação de carcaças ao longo das diferentes etapas do processamento.

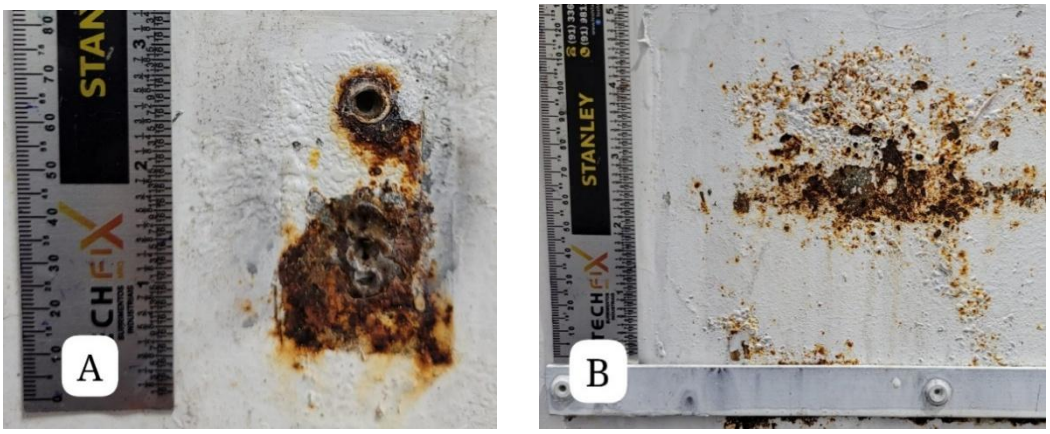
Figura 1 - (a) Suporte para bandeja plástica; (b) Suporte para bandeja plástica; (c) Suporte para bandeja plástica



Fonte: autoria própria.

Para a análise da corrosão em suporte para bandeja plástica em ambiente frigorífico (Figuras 1a, 1b e 1c) Foram feitos registros fotográficos evidenciando sinais de degradação por corrosão. A inspeção revelou sinais de corrosão localizada nas regiões de solda indicando a diferença de potencial entre as regiões, além disso na base do suporte foram observados corrosão galvânica pela diferença de materiais na sua construção, onde os parafusos são construídos em aço inoxidável e as porcas em aço carbono, por fim as juntas soldadas revelam sinais de degradação localizada devido ao acúmulo de água. A estrutura analisada é fabricada em aço inoxidável 304, material conhecido por sua resistência à corrosão, mas que pode sofrer degradação em ambientes com alta umidade e agentes químicos agressivos, como cloretos. Esse fenômeno foi possivelmente agravado pela exposição a umidade elevada e baixas temperaturas, que favorecem a formação de condensado e dificultam a secagem superficial do metal. Além disso, observa-se que a presença de substâncias de limpeza e agentes químicos contribui para a aceleração do processo corrosivo (Lavor; Moura, 2018).

Figura 2 - (a) e (b) Painel isotérmico



Fonte: autoria própria.

A corrosão observada no painel isotérmico com estrutura externa de aço galvalume [2](Figuras 2a e 2b) mesmo com a presença de tinta a base de poliuretano, indica a ocorrência de um processo de degradação avançado do revestimento metálico. Observa-se que o processo corrosivo foi iniciado na região dos parafusos decorrente ao mecanismo de corrosão por fresta. O aço galvalume possui uma camada protetora composta por alumínio e zinco, que normalmente oferece alta resistência contra agentes corrosivos. No entanto, em ambientes de refrigerados e alta umidade, como frigoríficos, a condensação contínua e o acúmulo de água podem comprometer essa proteção. Pequenas fissuras ou imperfeições na tinta expõem o revestimento ao contato com a umidade e agentes químicos presentes no ambiente, acelerando a corrosão ao longo do tempo.

Além disso, o alumínio presente no revestimento forma uma barreira passiva contra a corrosão, mas, quando essa camada é danificada, o zinco entra em ação como um elemento de sacrifício para proteger o aço subjacente. Esse processo, conhecido como corrosão galvânica localizada, pode levar à formação de pontos de oxidação intensa, principalmente em áreas onde a tinta foi comprometida. Com o tempo, a degradação da camada protetora expõe diretamente o aço à umidade, resultando em corrosão acelerada, perda de material e possíveis falhas estruturais na superfície do painel isotérmico (Vasques, 2016).

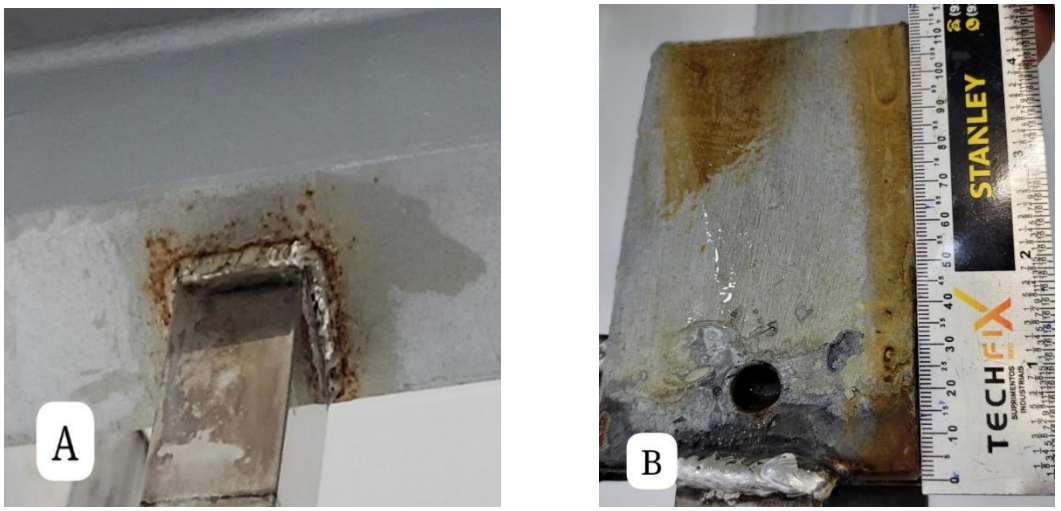
Figura 3 – Válvula esférica de inox 304 e conexão hidráulica de aço 1112

Fonte: autoria própria.

No caso estudado na Figura 3, apresenta um cenário de corrosão acentuada em uma válvula esférica de aço inox 304 e uma mangueira com conexão de aço carbono 1112, expostas a um ambiente de baixa temperatura. A oxidação observada é um indicativo de um fenômeno conhecido como corrosão induzida por condensação, que ocorre devido à condensação da umidade do ar sobre as superfícies metálicas frias, criando uma fina camada de líquido resfriado. Em frigoríficos, a alta umidade relativa combinada com ciclos de congelamento e descongelamento pode intensificar a formação de pontos de corrosão, especialmente em materiais como o aço carbono, que tem menor resistência à corrosão em comparação ao aço inoxidável.

[2] O aço Galvalume é um tipo de aço revestido com uma liga composta por 55% de alumínio, 43,5% de zinco e 1,5% de silício. Esse revestimento confere ao material uma excelente resistência à corrosão, combinando a proteção galvânica do zinco com a barreira protetora proporcionada pelo alumínio.

Figura 4 - (a) Estrutura de sustentação de nória; (b) Estrutura de sustentação de trilhos



Fonte: Autoria própria.

Na figura 4a e 4b observada foi realizada uma solda entre o aço carbono 1045 e o aço inox 304 nas estruturas da nória e da sustentação dos trilhos indica a ocorrência de degradação acelerada devido à diferença entre os materiais unidos, originando assim a corrosão galvanica. O aço inoxidável 304 possui resistência à corrosão devido à presença de cromo, que forma uma camada passiva protetora, enquanto o aço carbono 1045 conter maior teor de carbono sendo ainda mais suscetível à corrosão, especialmente em ambientes úmidos e frios, como frigoríficos. Durante a soldagem, alterações microestruturais na Zona Termicamente Afetada (ZTA) podem reduzir a resistência à corrosão, criando regiões mais vulneráveis. Se a soldagem não for feita com consumíveis apropriados ou se houver contaminação do aço inox por partículas de ferro, a camada protetora pode ser comprometida, tornando o material mais propenso à oxidação localizada.

Além da corrosão galvânica, a corrosão por pites[3] pode ocorrer na região da solda e nas proximidades, principalmente no aço inox 304. Esse tipo de corrosão se manifesta como pequenos pontos de perfuração na superfície metálica, causados pela quebra da camada passiva protetora em presença de cloretos ou umidade constante. Em frigoríficos, onde a umidade condensada pode conter traços de sais e outras impurezas, esse processo se intensifica, formando pontos de corrosão profunda que podem comprometer a integridade estrutural da junta soldada. Com o tempo, essas pequenas perfurações podem crescer e levar a falhas estruturais, reduzindo a vida útil dos componentes e aumentando o risco de colapso da sustentação dos trilhos e da nória (Rodrigues, 2021; Pereira, 2019).

A análise das imagens acima mostra áreas de corrosão em estruturas metálicas de um frigorífico, é fundamental para compreender os impactos deste fenômeno no ambiente industrial, particularmente na indústria de alimentos.

A presença de corrosão observada nas imagens sugere que houve um processo gradual de degradação do material, possivelmente devido à exposição a substâncias corrosivas como cloretos e à umidade. Essa deterioração compromete não apenas a integridade das

[3] A morfologia de pites refere-se às características das cavidades formadas pela corrosão localizada em materiais metálicos. Essas cavidades podem ter formas e tamanhos variados, geralmente arredondados ou irregulares, e sua distribuição pode ser esparsa ou concentrada.

estruturas metálicas, mas também a segurança e a higiene do ambiente, elementos fundamentais em um frigorífico (Lavor; Moura, 2018). A oxidação visível nas imagens, especialmente em pontos críticos como junções e soldas, revela vulnerabilidades que podem acelerar o processo corrosivo em razão da dificuldade de manutenção nesses pontos, além da possível utilização de materiais inadequados para esse tipo de ambiente (Caetano, 2016).

No contexto industrial, a corrosão não apenas reduz a vida útil e eficiência dos equipamentos, como também representa um potencial risco de contaminação química e microbiológica para os produtos alimentícios, uma vez que partículas de "ferrugem" podem entrar em contato com os alimentos. Além disso, a fragilidade estrutural resultante compromete a capacidade de suportar cargas e tensões, aumentando o risco de falhas mecânicas (Lavor; Moura, 2018).

Portanto, é indispensável a adoção de medidas preventivas e corretivas para mitigar os efeitos da corrosão em frigoríficos. A escolha de materiais adequados, como aço inoxidável com alta resistência à corrosão, aliada à aplicação de revestimentos protetores, constitui uma estratégia crucial para aumentar a durabilidade dos equipamentos. Além disso, a realização de manutenções regulares e inspeções contínuas das instalações é essencial para detectar precocemente eventuais problemas e implementar soluções antes que ocorram danos mais graves.

Em um estudo realizado sobre a interação entre erosão e corrosão de aços inoxidáveis e ao carbono, foi observado que a presença de cloretos e outros agentes corrosivos pode acelerar o processo de deterioração, comprometendo a longevidade dos materiais utilizados na indústria de alimentos (De Souza *et al.*, 2024).

As imagens analisadas de estruturas metálicas em frigoríficos evidenciaram corrosão em pontos críticos, como soldas e junções, áreas particularmente vulneráveis pela dificuldade de manutenção e pela exposição prolongada a substâncias corrosivas. Tais efeitos podem ser potencializados pelo uso inadequado de materiais para esses ambientes específicos. Estudos sugerem que a escolha de materiais adequados, como aços inoxidáveis com maior resistência à corrosão, pode minimizar esses danos, mas a falta de manutenção adequada contribui significativamente para o avanço da degradação (Póvoa, 2017; Caetano, 2016). Nesse sentido, a necessidade de uma abordagem estratégica para mitigação da corrosão é evidente, com a adoção de medidas preventivas, como revestimentos protetores e inspeções regulares, tornando-se imperativas (Kobilacz; Pariona, 2021).

A corrosão observada em ambientes de baixa temperatura também resulta em impactos diretos na operação e segurança alimentar. A presença de partículas de ferrugem, decorrente da degradação de estruturas metálicas, pode contaminar os produtos alimentares, aumentando os riscos de segurança para o consumidor final. Em adição, a fragilidade estrutural, causada pela corrosão, compromete a capacidade das estruturas em suportar tensões mecânicas, o que pode resultar em falhas catastróficas (Júnior *et al.*, 2023). Em estudos realizados sobre a variação da temperatura na resistência de ligas de aço inoxidáveis superferríticos com alto teor de molibdênio, foi demonstrado que, ainda que materiais resistentes sejam utilizados, a corrosão permanece uma preocupação em ambientes industriais de alta umidade, necessitando de proteção adicional e manutenção constante (Lavor; Moura, 2018).

Além disso, os métodos de proteção contra a corrosão aplicados na indústria de alimentos têm se mostrado variados, mas com graus de sucesso diferenciados. A adoção de

revestimentos específicos e a utilização de ligas de metais mais resistentes à corrosão são algumas das estratégias mais comuns (Mesquita, 2022).

Outro ponto observado é o efeito sinérgico entre as condições internas, como a alta umidade e as baixas temperaturas, e a corrosão dos metais. Esse dado é particularmente relevante para a indústria de alimentos, onde frigoríficos são ambientes expostos a essas condições de forma constante. A escolha inadequada de materiais, como o aço carbono em vez do aço inoxidável, pode acelerar a degradação, demandando substituições frequentes e aumentando os custos operacionais (Rodrigues, 2021; Pereira, 2019).

A corrosão em ambientes de baixa temperatura na indústria de abate bovino é um desafio significativo, especialmente devido à alta umidade e à presença de agentes agressivos, como cloretos e compostos ácidos. Diversos estudos têm investigado os efeitos da corrosão em diferentes materiais utilizados nessas condições, analisando os mecanismos envolvidos e os principais fatores que contribuem para a degradação dos componentes metálicos. A Tabela 1 apresenta um compilado dos principais resultados desses estudos, destacando os autores, os materiais analisados e as conclusões obtidas sobre os tipos de corrosão predominantes nesses ambientes.

Tabela 1 – Principais resultados dos estudos de corrosão em ambientes de baixa temperatura na indústria de alimentos

Autor	Estudo	Resultados Principais
Caetano (2016)	Soldagem de aços inoxidáveis ferríticos	Soldas são áreas vulneráveis à corrosão devido à exposição prolongada e à dificuldade de manutenção.
De Souza *et al*. (2024)	Interação de erosão e corrosão em aços	A presença de cloretos acelera a degradação dos metais, comprometendo a durabilidade de aços inoxidáveis.
Júnior *et al*. (2023)	Corrosão de carcaças metálicas	A corrosão compromete a integridade estrutural, aumentando os riscos de falhas mecânicas.
Kobilacz; Pariona (2021)	Solidificação de aços inoxidáveis	A escolha inadequada de materiais em ambientes frios favorece a corrosão, mesmo com materiais resistentes.
Lavor; Moura (2018)	Resistência à corrosão de ligas de aço superferrítico	A resistência de ligas de aço inoxidáveis é afetada por variações de temperatura e ambientes de alta umidade.
Luz (2018)	Monitoramento de corrosão em diversos metais	Condições climáticas adversas aumentam significativamente a taxa de corrosão, especialmente em aço carbono.
Mesquita (2022)	Estudo de caso sobre corrosão	Métodos de proteção, como revestimentos protetores, são essenciais, mas requerem manutenção constante.
Póvoa (2017)	Aço inoxidável na indústria de alimentos	O aço inoxidável apresenta melhor resistência à corrosão em comparação a outros metais usados na indústria.
Rodrigues (2021)	Deformação a frio em aços inoxidáveis	Deformações e processamento a frio podem aumentar a suscetibilidade à corrosão de aços inoxidáveis.

A seguir, será realizada uma discussão, abordando questões para o entendimento dos impactos da corrosão na indústria de alimentos em ambientes de baixa temperatura. Serão explorados, em detalhes, a influência das ligas metálicas na resistência à corrosão, os efeitos da corrosão na segurança alimentar e na qualidade dos produtos, os métodos eficazes de monitoramento e prevenção da corrosão, além de uma análise comparativa

entre os métodos tradicionais e inovadores de soldagem para reduzir o problema em equipamentos industriais. Essas discussões são fundamentais para uma compreensão abrangente das soluções práticas e tecnológicas que podem ser aplicadas no setor industrial para minimizar os efeitos da corrosão e garantir a eficiência e segurança das operações.

3.1. A INFLUÊNCIA DAS LIGAS METÁLICAS NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM AMBIENTES DE BAIXA TEMPERATURA

A resistência à corrosão em ambientes de baixa temperatura está fortemente associada à composição e às características das ligas metálicas utilizadas na indústria. Ligas metálicas adequadas são essenciais para garantir a durabilidade das estruturas, especialmente em ambientes que combinam umidade e baixas temperaturas, como os encontrados na indústria de alimentos, em frigoríficos. Nesses ambientes, a escolha correta dos materiais pode reduzir significativamente os impactos da corrosão, aumentando a vida útil dos equipamentos e prevenindo problemas de contaminação dos alimentos. O aço inoxidável se destaca pela sua resistência à corrosão quando comparado ao aço carbono fosfatizado, principalmente em ambientes onde a exposição à umidade é constante (Shimoda, 2021).

Aços inoxidáveis com altos teores de molibdênio e cromo apresentam desempenho superior em ambientes de baixa temperatura. A adição de molibdênio em ligas inoxidáveis superferríticas melhora significativamente sua resistência à corrosão localizada, especialmente em ambientes agressivos, como os que contêm substâncias químicas provenientes de produtos alimentares ou agentes de limpeza (Lavor; Moura,2018). As ligas com alto teor de molibdênio, por exemplo, têm se mostrado eficazes na prevenção da corrosão por pites, uma forma localizada de corrosão que é comum em frigoríficos devido à condensação e à presença de cloretos. Esse fator é fundamental para a escolha dos materiais na fabricação de equipamentos e estruturas que operam sob essas condições, uma vez que a integridade estrutural é crucial para garantir a segurança alimentar.

Além disso, o uso de ligas metálicas inadequadas pode levar ao fenômeno da corrosão galvânica, que ocorre quando dois metais diferentes estão em contato em um ambiente condutivo, como a combinação de baixa temperatura e alta umidade. A escolha de materiais compatíveis e a aplicação de revestimentos anticorrosivos são estratégias para mitigar esse tipo de corrosão. Estudos demonstram a eficácia de revestimentos de conversão química em substratos de alumínio em ambientes de baixa temperatura, sugerindo que esse tipo de tratamento pode ser aplicado em equipamentos da indústria de alimentos para melhorar a resistência à corrosão (Yao; Zhang; Xin, 2024).

Outra consideração importante é a soldagem de materiais metálicos, que pode influenciar diretamente a resistência à corrosão das ligas utilizadas. A escolha do tipo de soldagem e a compatibilidade entre os materiais podem reduzir significativamente a suscetibilidade à corrosão nas zonas afetadas pelo calor. A soldagem inadequada pode gerar microfissuras e zonas com concentração de tensões, onde a corrosão tende a iniciar. Portanto, é fundamental que a soldagem de ligas metálicas em ambientes de baixa temperatura seja realizada de forma controlada, com materiais apropriados e procedimentos específicos para evitar falhas prematuras nas juntas soldadas (Caetano, 2016).

Em adição, em estruturas onde são utilizados elementos de fixação, como parafusos e suportes, a escolha de materiais resistentes à corrosão é igualmente importante (Souza; Shimoda, 2021). Elementos de fixação de aço inoxidável, por exemplo, apresentam maior durabilidade e menor suscetibilidade à corrosão, comparados a elementos de aço carbono fosfatizado, que tendem a corroer mais rapidamente em ambientes úmidos e frios. Isso demonstra a importância de considerar todas as partes da estrutura ao escolher os materiais, uma vez que a corrosão em pequenos componentes pode comprometer a integridade de todo o sistema.

As ligas como o aço inoxidável com teor de cromo acima de 11% que é responsável por formar uma camada passiva de óxido na superfície do metal, oferecem maior proteção contra a corrosão em comparação com outras opções de metais, como o aço carbono fosfatizado (Souza; Shimoda, 2021). No entanto, a resistência desses materiais pode ser aprimorada ou comprometida dependendo de suas composições químicas e tratamentos térmicos.

Além disso, a influência de processos de deformação mecânica sobre a resistência à corrosão é outro aspecto a ser considerado. A transformação martensítica por deformação a frio em aços inoxidáveis austeníticos, destacando como a austenita pode se transformar em martensita sob a ação de forças mecânicas externas (Rodrigues, 2021). A formação de martensita α', que resulta em uma microestrutura mais resistente e dura, pode ser vantajosa em certos contextos industriais, mas ao mesmo tempo pode comprometer a uniformidade da dureza e reduzir a ductilidade do material. Esse fenômeno é particularmente relevante para a indústria de alimentos, onde as estruturas metálicas estão constantemente expostas a ciclos de carga e descarga, o que pode induzir deformações localizadas que favorecem essa transformação microestrutural. A transformação martensítica, embora beneficie a resistência mecânica, pode aumentar a suscetibilidade à corrosão, especialmente em ambientes de baixa temperatura.

Assim, a combinação de fatores como composição química, tratamentos térmicos e deformação mecânica impacta diretamente a performance das ligas metálicas em ambientes de baixa temperatura. No contexto dos frigoríficos, onde a corrosão é um problema constante devido à alta umidade e ao uso de agentes de limpeza agressivos, a escolha de ligas com alto teor de molibdênio e níquel, pode ser uma solução eficaz (Lavor; Moura, 2018). Além disso, a deformação a frio, deve ser controlada para evitar a formação excessiva de martensita α', que pode reduzir a ductilidade dos materiais e aumentar a suscetibilidade à corrosão localizada em áreas de tensão (Rodrigues, 2021).

A seleção adequada de ligas metálicas e o controle dos processos de fabricação, como tratamentos térmicos e métodos de soldagem, são essenciais para maximizar a resistência à corrosão em ambientes de baixa temperatura.

3.2. EFEITOS DA CORROSÃO NA SEGURANÇA ALIMENTAR E MÉTODOS DE PREVENÇÃO EM AMBIENTES DE BAIXA TEMPERATURA

A presença de corrosão em estruturas metálicas pode levar à contaminação dos produtos alimentícios, uma vez que fragmentos de óxido de ferros ou outras substâncias corrosivas podem ser transferidas para os alimentos, comprometendo sua qualidade e segurança (Luz, 2018). Em situações em que as temperaturas são mantidas em níveis baixos para preservar a integridade dos alimentos, a umidade e a presença de substâncias químicas de limpeza podem exacerbar o processo corrosivo, aumentando o risco de contaminação.

Esse cenário evidencia a necessidade de um monitoramento rigoroso das condições de higiene e integridade das estruturas, pois a corrosão não apenas compromete a qualidade dos alimentos, mas também representa um risco à saúde dos consumidores.

Para prevenir esses efeitos adversos, é essencial implementar métodos de prevenção e monitoramento da corrosão, particularmente em ambientes com temperaturas controladas. Entre as práticas recomendadas, a seleção adequada de materiais com maior resistência à corrosão é fundamental. O uso de ligas de aço inoxidável, que apresentam melhores propriedades em relação a resistência à corrosão, pode minimizar a degradação das estruturas metálicas (Kobilacz; Pariona, 2021). Além disso, a aplicação de revestimentos protetores pode atuar como barreira, impedindo o contato entre o metal e agentes corrosivos, assim como a manutenção regular das estruturas é crucial para a identificação e correção de falhas antes que se tornem graves.

Outras estratégias incluem a adoção de processos de soldagem mais avançados, que garantam uma melhor integridade estrutural das juntas, uma vez que essas áreas são particularmente vulneráveis à corrosão. A implementação de sistemas de monitoramento contínuo também é uma abordagem eficaz, permitindo que os operadores detectem e respondam rapidamente a qualquer sinal de corrosão (Luz, 2018). Tais medidas não apenas contribuem para a durabilidade dos equipamentos, mas também são vitais para garantir que os padrões de segurança alimentar sejam mantidos, evitando riscos à saúde pública.

A interação entre a corrosão e os métodos de prevenção deve ser constantemente estudada e aprimorada, levando em conta as especificidades de cada ambiente industrial. Por exemplo, a corrosão em frigoríficos pode ser distinta daquela observada em outras instalações, devido às condições de temperatura e umidade específicas. Portanto, é imperativo que as indústrias de alimentos desenvolvam protocolos adaptados às suas necessidades, incorporando tecnologias de ponta que possibilitem o monitoramento em tempo real das condições de suas instalações. A aplicação de técnicas modernas de soldagem e o uso de ligas metálicas com propriedades superiores se mostram como investimentos essenciais na luta contra a corrosão, contribuindo não apenas para a longevidade dos equipamentos, mas também para a segurança alimentar (Kobilacz; Pariona, 2021).

3.3. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TRADICIONAIS DE SOLDAGEM E NOVAS TÉCNICAS PARA REDUZIR A CORROSÃO EM EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

A soldagem é um dos processos mais críticos na fabricação e manutenção de equipamentos industriais, especialmente aqueles expostos a ambientes corrosivos, como os encontrados na indústria de alimentos. Métodos tradicionais de soldagem, como a soldagem a arco elétrico e a soldagem por resistência, têm sido amplamente utilizados devido à sua simplicidade e eficácia. No entanto, esses métodos muitas vezes não consideram as necessidades específicas de resistência à corrosão, resultando em falhas prematuras e comprometendo a segurança alimentar. Assim, novas técnicas de soldagem têm sido desenvolvidas com foco na melhoria da resistência à corrosão, especialmente em ambientes de baixa temperatura.

A soldagem a arco elétrico, um dos métodos tradicionais, é caracterizada por sua versatilidade e capacidade de unir diferentes tipos de metais. No entanto, a aplicação deste método pode resultar em zonas afetadas pelo calor, que podem comprometer a

integridade do material soldado. A formação de microestruturas indesejadas nessas zonas é um fator crítico que pode levar à corrosão localizada, como a corrosão por pites, frequentemente observada em ambientes úmidos e frios (Silva, 2016). Além disso, a escolha inadequada de materiais de enchimento e a falta de controle sobre os parâmetros de soldagem podem intensificar esses problemas. Por outro lado, técnicas mais recentes, como soldagem por arco plasma (PAW) e soldagem a arco submerso (SAW), oferecem maior controle sobre a temperatura de soldagem e a formação de microestruturas, resultando em soldas com melhor resistência à corrosão e maior durabilidade (Bugarin, 2024).

O uso de aços inoxidáveis, especialmente aços inoxidáveis duplex e superferríticos, tem se mostrado eficaz na redução da corrosão em equipamentos da indústria de alimentos. Estudos demonstram que a combinação de diferentes elementos de liga, como cromo e molibdênio, nas novas ligas de aço inoxidável contribui para melhorar a resistência à corrosão em ambientes adversos (Lavor; Moura, 2018). Essas ligas podem ser soldadas utilizando métodos avançados, como a soldagem a arco pulsado, que permite uma melhor penetração e uma menor formação de escórias, resultando em juntas mais resistentes e menos suscetíveis à corrosão.

A comparação entre métodos tradicionais e novas técnicas também se estendem à aplicação de revestimentos protetores após a soldagem. Os métodos tradicionais geralmente não consideram a aplicação de revestimentos anticorrosivos, o que pode levar a um aumento significativo na taxa de corrosão. Novas abordagens, que combinam soldagem com a aplicação de revestimentos, têm demonstrado resultados promissores na prevenção da corrosão. Revestimentos baseados em polímeros ou cerâmicas, quando aplicados em conjunto com técnicas avançadas de soldagem, oferecem uma camada adicional de proteção contra agentes corrosivos, aumentando a vida útil dos equipamentos (Yao; Zhang; Xin, 2024).

Além disso, a automação e o controle preciso dos parâmetros de soldagem nas novas técnicas têm contribuído para uma redução significativa das falhas por corrosão. A soldagem automatizada proporciona um controle mais rigoroso da temperatura e da velocidade de soldagem, minimizando a formação de microestruturas que favorecem a corrosão. Essa abordagem não só melhora a resistência à corrosão das juntas soldadas, mas também garante a qualidade e a segurança dos produtos alimentícios processados em equipamentos construídos com esses materiais (Bugarin, 2024).

A evolução das técnicas de soldagem é essencial para enfrentar os desafios da corrosão em ambientes de baixa temperatura, especialmente na indústria de alimentos. A combinação de materiais avançados, métodos de soldagem inovadores e aplicação de revestimentos protetores proporciona uma estratégia eficaz para mitigar os impactos da corrosão. A adoção dessas novas técnicas não apenas melhora a durabilidade dos equipamentos, mas também assegura a segurança alimentar, um aspecto fundamental na operação de frigoríficos e outras instalações da indústria de alimentos.

4. CONCLUSÃO

A corrosão em ambientes de baixa temperatura, especialmente na indústria de abate bovino, é um problema que afeta diretamente a eficiência dos processos industriais e a segurança dos produtos. O estudo dos casos apresentados demonstrou que, apesar das soluções tecnológicas avançadas disponíveis no mercado, o fenômeno corrosivo ainda

representa um desafio significativo para os fabricantes de equipamentos e gestores de manutenção. As características ambientais dos frigoríficos e indústrias alimentícias em geral, onde a umidade e o uso de agentes de limpeza agressivos são frequentes, criam condições propícias para a corrosão, afetando diversos materiais, principalmente os metais utilizados nos equipamentos.

A análise realizada mostrou que a escolha dos materiais é um dos fatores mais críticos para minimizar os efeitos da corrosão em baixas temperaturas. Materiais como o aço inoxidável, especialmente as ligas com alto teor de cromo e molibdênio, têm demonstrado eficácia superior devido à sua elevada resistência intrínseca à corrosão, embora possam apresentar limitações específicas em ambientes com alta concentração de cloretos. Contudo, mesmo esses materiais apresentam limitações quando submetidos a condições específicas de operação. A presença de cloretos, por exemplo, pode acelerar a corrosão, mesmo em ligas consideradas resistentes, evidenciando a necessidade de uma abordagem mais cautelosa na seleção dos materiais e no tratamento de superfícies. Além disso, as ligas metálicas devem ser selecionadas não apenas com base em sua resistência à corrosão, mas também considerando outros fatores, como resistência mecânica e adequação ao processo de fabricação.

Outro ponto importante observado é o papel da manutenção e do monitoramento contínuo nos processos industriais. A implementação de técnicas de prevenção da corrosão, como revestimentos protetores e a escolha de métodos de soldagem adequados, pode prolongar significativamente a vida útil dos equipamentos. No entanto, a falha em manter um monitoramento constante da integridade dos materiais pode resultar em falhas catastróficas, com impacto direto na qualidade dos produtos alimentícios e nos custos operacionais das indústrias devido a necessidade de substituição de equipamentos precocemente. A corrosão, quando não adequadamente controlada, pode levar à contaminação dos alimentos, comprometendo a segurança alimentar, além de causar paradas inesperadas de produção, o que acarreta prejuízos econômicos substanciais.

O estudo de casos práticos reforçou a necessidade de uma inspeção de rota regular para monitoramento e o combate à corrosão em ambientes de baixa temperatura. Além da equipe de manutenção utilizar de uma seleção criteriosa de materiais, usar técnicas avançadas de fabricação e soldagem, e monitoramento contínuo e uma política de manutenção preventiva rigorosa.

O uso de fotografias de equipamentos oxidados no frigorífico de abate bovino ilustrou claramente os danos que podem ocorrer quando esses fatores não são devidamente considerados. Os resultados mostraram que, embora existam métodos eficazes de prevenção, a corrosão em baixas temperaturas exige atenção constante e uma rota de inspeção regular para garantir a durabilidade dos equipamentos.

A adoção de novas técnicas de soldagem como TIG (*Tungsten Inert Gas*) com purga de gás inerte (SAW) e a substituição dos métodos tradicionais podem também desempenhar um papel crucial na mitigação da corrosão. O uso de gases inertes, como o argônio ou o hélio, cria um ambiente livre de contaminantes, evitando a formação de óxidos ou outras impurezas na área de soldagem. Isso resulta em uma fusão mais limpa e homogênea, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade da junta soldada. A proteção gasosa também reduz a possibilidade de porosidade e rachaduras, que podem ser pontos de vulnerabilidade à corrosão, especialmente em materiais sujeitos a ambientes agressivos. Além disso, essa técnica minimiza a oxidação da peça e preserva a integridade das propriedades do material base, proporcionando uma resistência superior à corrosão,

especialmente em aços inoxidáveis e ligas especiais. Processos mais modernos permitem não apenas maior precisão no controle da integridade das juntas soldadas, mas também a aplicação de materiais com maior resistência à corrosão, contribuindo para uma performance superior em ambientes refrigerados. Isso é especialmente relevante na indústria de alimentos, onde a qualidade dos produtos e a segurança dos consumidores estão diretamente ligadas à confiabilidade dos processos e dos equipamentos. Assim, a inovação tecnológica aplicada à prevenção da corrosão deve ser considerada uma prioridade estratégica para as empresas do setor alimentício.

Portanto, a compreensão dos mecanismos de corrosão, associada ao desenvolvimento e à aplicação de novas tecnologias, é fundamental para que a indústria de alimentos possa superar os desafios impostos por ambientes de baixa temperatura. O aprimoramento contínuo das práticas de fabricação e manutenção, juntamente com a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e técnicas, permitirá uma operação mais eficiente, segura e econômica.

REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resoluções e normas.** RDC 498/2021. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br. Acesso em: 16 fev. 2025.

[2] BRCGS. *Global Standard for Food Safety* – Issue 9. **Guildford**: BRCGS, 2022. ISBN 978-1-78490-447-0. Disponível em: https://www.brcgs.com/product/global-standard-food-safety-issue-9/p-13279/. Acesso em: 3 mar. 2025.

[3] BUGARIN, Aline de Fátima Santos. **Influência dos parâmetros de soldagem GTAW-DF do aço lean duplex 2101 na microestrutura e resistência à corrosão**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

[4] CAETANO, G. Q. **Soldagem similar de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos pelo processo "friction stir welding"**. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

[5] DE SOUZA, Vitor Pagani. **Interação em erosão e corrosão de aços inoxidáveis, ao carbono e de alta resistência em ambientes livre e contendo cloretos para aplicação no agronegócio.** 2024.

[6] GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

[7] JÚNIOR, Onidio Teixeira Pinto. **Corrosão da carcaça metálica de regeneradores tipo Cowpers**. 2023.

[8] KOBILACZ, Luiz Gustavo; PARIONA, Moisés Meza. **Simulação numérica por elementos finitos da solidificação de aços inoxidáveis**. *Revista Brasileira de Iniciação Científica (RBIC)*, IFSP Itapetininga, v. 8, e021025, p. 1-17, 2021.

[9] LAVOR, Camila Alves de; MOURA, Lorena Braga. **Efeito da variação da temperatura na resistência à corrosão de novas ligas de aço inoxidáveis superferríticos com alto molibdênio**. 2018. Ministério da Educação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação – PRPI, 2018.

[10] LUZ, Ederson Gean da. **Monitoramento da corrosão no aço carbono SAE 1020, aço galvanizado, alumínio e cobre, considerando as condições climáticas serranas e litorâneas de Santa Catarina**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2018.

[11] MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2019. 337 p.

[12] MESQUITA, Gerson Gabriel Oliveira. **Estudo de caso sobre a corrosão em uma planta de extração de ouro**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

[13] PEREIRA, Glaucio Emanuel de Souza. **Análise de métodos de proteção contra a ação da corrosão na indústria salineira**. 2019.

[14] PÓVOA, Paulo Victor Nogueira. **Aço inoxidável como material para equipamentos da indústria de alimentos**. 2017.

[15] RODRIGUES, Luiza Leão Fonseca Martinez. **Análise dos efeitos da deformação a frio em aços inoxidáveis austeníticos**. 2021. Projeto final (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Educação Superior, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2021.

[16] SILVA, G. B. S. **Caracterização de cupons de corrosão através de diferentes técnicas comparativas**. 2016.

[17] SOUZA, Juliana Otaviano; SHIMODA, Mariana Mitsuko. **Análise comparativa da corrosão entre elementos de fixação em aço inoxidável e aço carbono fosfatizado**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras Dom Bosco, Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2021.

[18] VASQUES, Roberta Bastos. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono com revestimento nanocerâmico à base de zircônio**. 2016.

[19] YAO, Lina; ZHANG, Maocai; XIN, Bo. **Formation of an anti-corrosive chemical conversion coating on aluminium substrate under low temperature**. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2024.

Capítulo 7

Influence of cryolite ratio on phase formation and reactivity of aluminosilicate refractories: a thermodynamic study using factSage

Paulo Emilio Tavares
Ivan Mauricio Daza Prada
Cesar Yugi Narita
Catia Fredericci

Abstract: Thermodynamic simulations were performed using FactSage to investigate the chemical reactivity of an aluminosilicate refractory, based on a crystalline composition reported in the literature, when exposed to a NaF–cryolite melt. The objective of this study was to evaluate the influence of melt composition on phase stability and refractory degradation. The melt composition was defined according to ISO 20292:2009, which addresses refractory corrosion in cryolitic environments. Stable phases were calculated over the temperature range from 500 °C to 1000 °C. Simulations were initially conducted at a cryolite ratio (CR) of 6, representative of standardized corrosion test conditions, and compared with a CR of 2.2, typical of industrial primary aluminum production. The results indicate differences in phase stability as a function of both temperature and melt composition. At higher CR, the formation of silicate-rich phases upon cooling from 1000 °C to 500 °C is thermodynamically favored, leading to increased consumption of refractory constituents. This conservative approach provides a safety margin, as reactivity under industrial conditions (lower CR) is expected to be lower, enhancing refractory reliability and operational safety.

1. INTRODUCTION

Aluminosilicate refractories play a crucial role in maintaining the structural integrity of electrolytic cells used in primary aluminum production, serving as thermal and chemical linings. They are typically composed of mullite ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$), silica (SiO_2), andalusite (Al_2SiO_5), and alumina (Al_2O_3), with compositions varying depending on the manufacturer (Siljan, Schoning and Grande, 2002; Madsen *et al.*, 1991).

Despite their advantages, these refractories are susceptible to degradation in fluoride-rich environments, particularly in cryolitic melts (Brandvik *et al.*, 2017). Corrosion is a key factor limiting cell lifetime, impacting operational efficiency and maintenance costs. In the Hall–Héroult process, alumina (Al_2O_3) is dissolved in a molten cryolite bath (Na_3AlF_6–AlF_3–CaF_2) at temperatures between 950 °C and 970 °C. The cryolite ratio (NaF/AlF_3), typically ranging from 2.2 to 3.0, strongly affects bath properties, including viscosity, conductivity, and alumina solubility, as well as refractory stability ((Salem *et al.*, 2025; Yurkov, 2017; Wei *et al.* 2019).

Corrosion involves complex interactions between oxides, aluminosilicates, and molten fluoride salts, leading to phase transformations, formation of aluminates, sodium silicates, and fluoroaluminates, volatilization of SiF_4, and progressive material loss with microstructural changes (Siljan, Schoning and Grande, 2002). The cryolite ratio significantly influences these mechanisms by altering phase stability and the activity of reactive species, resulting in different corrosion behaviors under varying operating conditions.

Thermodynamic simulations provide a valuable approach to investigate these systems, enabling the prediction of stable phases, reaction pathways, and reactive zones under diverse temperatures and compositions. Such analyses can provide insights into refractory degradation mechanisms.

2. METHODS

2.1. THERMODYNAMIC SIMULATIONS

Thermodynamic simulations were performed with FactSage 7.3, using the FThall and FactPS databases. Calculations were conducted under an inert atmosphere at 1 atm over the temperature range of 1000 °C to 500 °C, in 50 °C increments. The crystalline phase assemblage of the aluminosilicate refractory, as reported in the literature (Madsen *et al.*, 1991; Table 1), was used as input to evaluate its chemical interaction with a NaF–Na_3AlF_6 (cryolite) melt, following ISO 20292:2009 conditions. A cryolite ratio of ~ 6 (40 g NaF and 60 g Na_3AlF_6) was adopted for the standard simulation. Additional simulations were performed at a cryolite ratio of 2.2 to represent typical industrial electrolytic cells.

It is acknowledged that vitreous phases may influence initial corrosion behavior. However, due to the lack of compositional data and their non-equilibrium nature, glassy phases were excluded from the equilibrium calculations.

Equilibrium phase fractions were calculated as a function of temperature from 1000 °C to 500 °C, and the composition of the liquid phase was analyzed between 1000 °C and 650 °C.

Table 1 – Composition of the crystalline phases of the aluminosilicate refractory

Refractory	Mullite	Cristobalite	Quartz	Andalusite
SA1	69,7 ± 0,6	29,4 ± 0,3	0,2 ± 0,1	2,1 ± 1,1

Madsen *et al.* (1991).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. THERMODYNAMIC SIMULATIONS

3.1.1. CRYOLITE RATIO (NaF/AlF_3) = 6

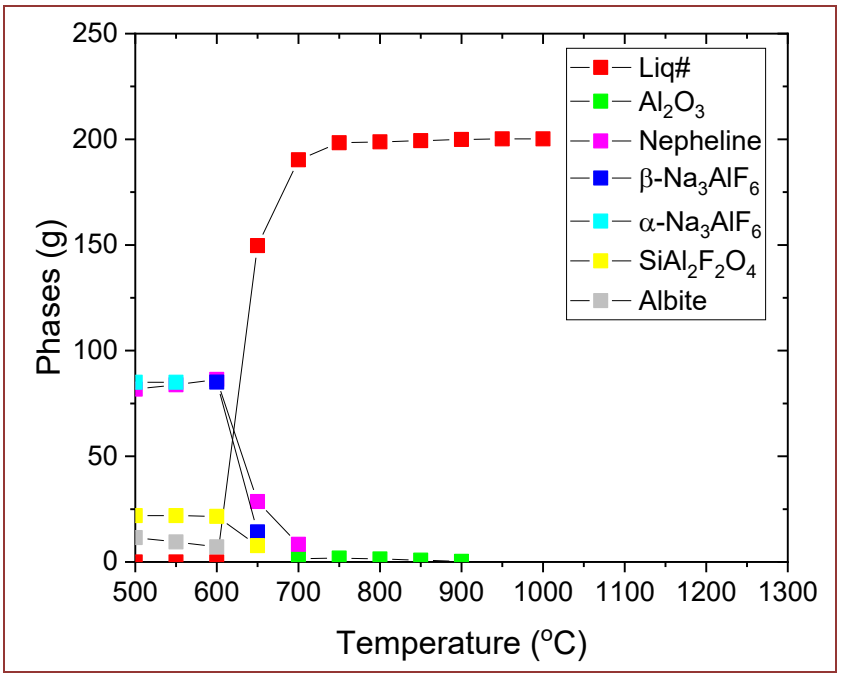
The thermodynamic simulations performed using FactSage, considering the interaction between the crystalline phases of the SA1 refractory and the corrosive agents at a cryolite ratio (NaF/AlF_3 = 6) (Figure 1), indicate that a liquid phase (Liq#1) forms at 1000 °C and progressively solidifies, becoming fully solid only below 650 °C. Nepheline ($NaAlSiO_4$) and albite ($NaAlSi_3O_8$) are not thermodynamically stable at high temperatures. Instead, they form as a result of the solidification of the liquid phase (Liq#1) during cooling below 750 °C. Therefore, their presence is associated with the cooling path rather than with equilibrium phase stability at elevated temperatures. In many post-mortem studies of aluminosilicate refractories used in electrolytic cells for primary aluminum production, X-ray diffraction and scanning electron microscopy frequently reveal the presence of these silicate phases (Narang *et al.*, 2019; Proshkin and Simakov, 2005). However, these phases should not be interpreted as inherently protective against severe corrosion over time, since they do not form as stable solid phases under high-temperature operating conditions. This distinction is essential for understanding the long-term behavior and durability of these refractories in industrial applications.

Recrystallization of cryolite is predicted to occur below 700 °C, accompanied by the α → β polymorphic transition at approximately 600 °C (Poncsak *et al.*, 2018), in agreement with the thermodynamic simulation results.

The appearance of $SiAl_2F_2O_4$ as a thermodynamically possible solid phase is not commonly reported in experimental studies. In thermodynamic databases, this compound represents a hypothetical mixed aluminum–silicon oxyfluoride corresponding to a local minimum in Gibbs free energy within the Al–Si–O–F system, rather than a well-established crystalline phase. It is important to note that FactSage is an equilibrium thermodynamic tool, and from a kinetic standpoint, the nucleation and growth of such a mixed Al–Si oxyfluoride phase are likely to be kinetically hindered. Structural complexity, limited diffusion of fluoride ions, and competition with more stable or kinetically favored phases, such as Al_2O_3 and residual glassy phases, significantly reduce the likelihood of its experimental detection. In addition, $SiAl_2F_2O_4$ may decompose according to the following reaction (Sutopo *et al.*, 2021):

$$SiAl_2F_2O_4 \rightleftharpoons SiO_2 + Al_2O_3 + SiF_4$$

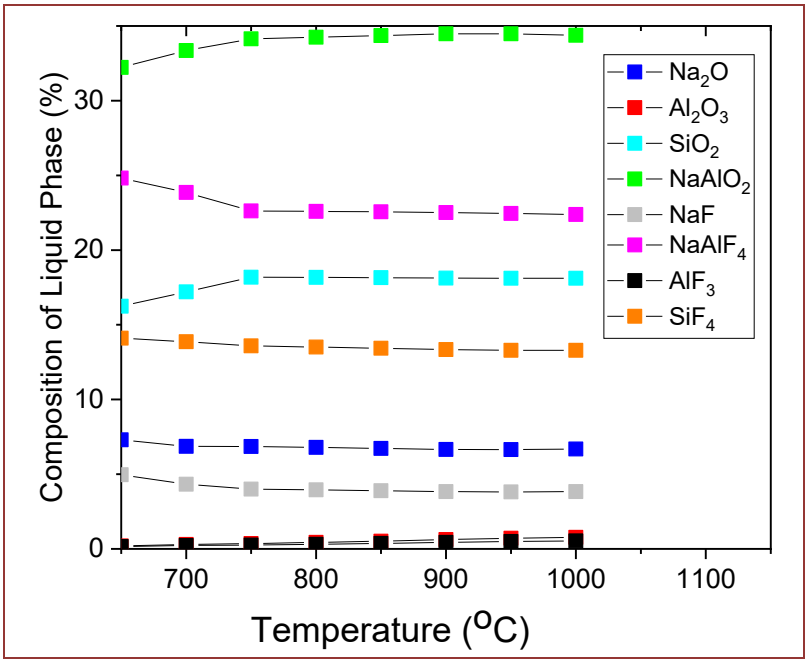
Figure 1. FactSage simulation of the phase evolution during cooling of a mixture containing 40 g NaF, 60 g cryolite, 69.7 g mullite, 29.4 g cristobalite, 0.2 g quartz, 2.1 andalusite, showing the calculated phase assemblage in the temperature range from 1000 °C to 500 °C. (Cryolite ratio = 6.0)



In this system, cryolite acts simultaneously as a source of sodium and fluoride ions. Sodium species act as strong network modifiers in aluminosilicates, while fluoride ions not only strongly complex Al^{3+} but also attack Si–O–Si bonds in the aluminosilicate network, contributing to its depolymerization (Mysen, Cody and Smith, 2004). Consequently, the mullite structure becomes destabilized, favoring the preferential extraction of aluminum into the liquid phase as both sodium aluminate ($NaAlO_2$) and complex aluminum fluorides such as $NaAlF_4$. Silicon dioxide is concomitantly released from the mullite structure and may remain dissolved in the liquid phase or form a silica-rich vitreous component. The incorporation of SiO_2, Na_2O, $NaAlO_2$, and $NaAlF_4$ within the same liquid phase (Figure 2) is therefore thermodynamically and chemically consistent, and aligns with experimental observations reported for the corrosion of aluminosilicate refractories by fluoride-containing fluxes (Lambotte and Chartrand, 2013). The formation of such a sodium- and fluoride-rich Na–Al–Si–O–F melt is characteristic of severe chemical corrosion processes, leading to enhanced mass transport, accelerated refractory degradation, and the development of silica-enriched residual phases.

The simulation also predicts the presence of SiF_4 within the liquid phase. Although thermodynamically favored, SiF_4 is a highly volatile species, and its stability in the condensed phase strongly depends on system conditions. In open or semi-open systems, SiF_4 is expected to volatilize rapidly, contributing to silicon loss from the refractory. In contrast, in closed systems or under elevated partial pressures, it may exist as a dissolved or transient species in the melt. Therefore, its appearance in FactSage outputs should be interpreted as an indication of the system's chemical tendency toward silica fluorination, rather than as evidence of a stable liquid component.

Figure 2. Composition of the liquid phase (Liq#1) presented in figure 1



3.1.2. CRYOLITE RATIO (NaF/AlF_3) = 2.2

An important point warrants critical consideration. The NaF/AlF_3 ratio prescribed in ISO 20292:2009 is approximately 6. When cryolite is expressed in terms of its fundamental components ($Na_3AlF_6 \rightarrow 3NaF + AlF_3$), a mixture containing 60 g of cryolite and 40 g of NaF corresponds to 76 g of NaF and 24 g of AlF_3. Based on the molar masses of Na_3AlF_6 (209.94 $g \cdot mol^{-1}$), NaF (41.99 $g \cdot mol^{-1}$), and AlF_3 (83.98 $g \cdot mol^{-1}$), this composition yields 1.81 mol of NaF and 0.285 mol of AlF_3, resulting in a NaF/AlF_3 molar ratio of approximately 6. This value is significantly higher than that typically employed in industrial aluminum electrolysis, where NaF/AlF_3 ratios close to 2.2 are commonly used. Consequently, the standard test environment is markedly more NaF-rich than the industrial electrolyte, which may alter phase equilibria, melt chemistry, and corrosion mechanisms, potentially limiting the representativeness of the test.

To evaluate conditions closer to industrial practice, an alternative composition representative of the interaction with the SA1 refractory was considered. It consisted of 52.38 g NaF, 47.62 g AlF_3, 67.7 g mullite, 0.2 g quartz, 29.4 g cristobalite, and 2.1 g andalusite, corresponding to 1.26 mol of NaF and 0.57 mol of AlF_3 ($NaF/AlF_3 \approx 2.2$), as shown in Figures 3 and 4. The effect of the cryolite ratio (CR) on phase formation can be understood in terms of the availability of sodium and the stability of fluoride versus oxide phases. At higher CR values (e.g., CR = 6), the system becomes sodium-rich, favoring the interaction of Na-bearing species with the aluminosilicate refractory components and present higher liquid phase (~200g – Figure 1) than that of RC=2.2 (~170g – Figure 3). This condition enhances the decomposition of mullite ($3Al_2O_3.2SiO_2$). The formation of nepheline ($NaAlSiO_4$) during cooling can be interpreted as the crystallization of a sodium aluminosilicate phase from a melt enriched in silica and sodium aluminate species (Na-Al-O). In contrast, at lower CR values (e.g., CR = 2.2), the higher availability of AlF_3 promotes the formation of complex fluoride phases such as $NaAlF_4$, effectively binding sodium within the fluoride system and reducing its participation in silicate formation. As a result, nepheline formation is suppressed at low CR (compare Figure 1 and Figure 3),

while it is significantly enhanced at high CR due to the increased availability of sodium and the shift in thermodynamic stability toward sodium aluminosilicate phases. Overall, the standardized test conditions can be considered more severe than those encountered in industrial operation, intentionally promoting higher reactivity. This conservative approach provides a safety margin, ensuring that under actual operating conditions, the reactivity is expected to be lower, and therefore more reliable and safer.

Figure 3. FactSage simulation of the phase evolution during cooling of a mixture 52.38 g NaF, 47.62 g AlF_3, 69.7 g mullite, 0.2 g quartz, 29.4 g cristobalite, and 2.1 g andalusite, showing the calculated phase assemblage in the temperature range from 1000 °C to 500 °C. (Cryolite ratio ≈ 2.2)

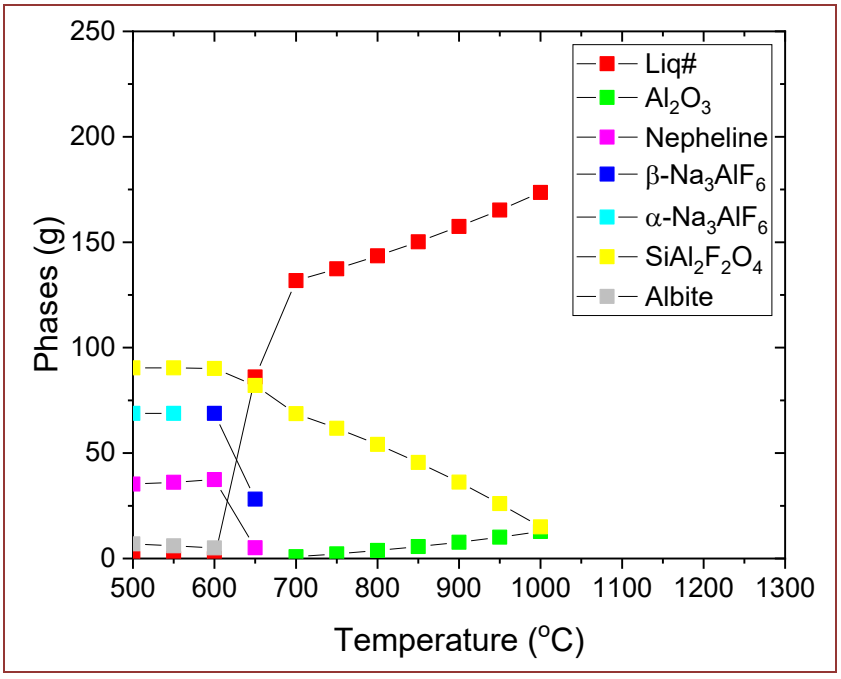
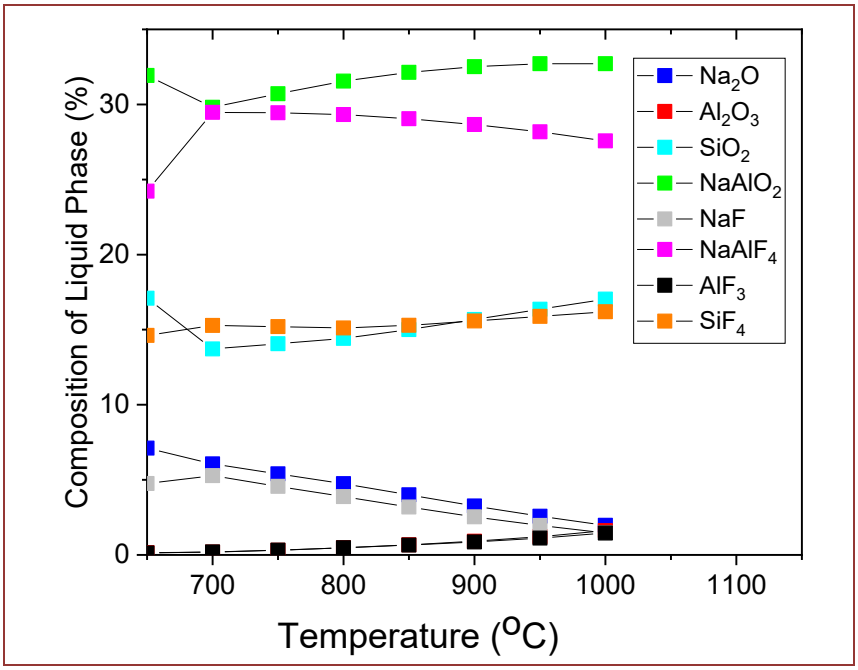


Figure 4. Composition of the liquid phase (Liq#1) presented in figure 3



4. CONCLUSIONS

Based on thermodynamic simulations performed using FactSage on the reactivity of crystalline phases in an aluminosilicate refractory at different cryolite ratios, the following conclusions are proposed:

- The presence of sodium and aluminum fluoride strongly promotes the formation of a complex Na–Al–Si–O–F liquid phase, which governs chemical interactions and corrosion mechanisms at high temperatures (> 750 °C).
- A comparison between the standardized condition defined by ISO 20292:2009 (CR = 6) and an industrially relevant condition (CR = 2.2) shows that increasing the cryolite ratio significantly increases both the fraction and persistence of the liquid phase. At higher cryolite ratios (e.g., CR = 6), the sodium-rich environment favors interactions with aluminosilicate refractory phases and may contribute to the decomposition of mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).
- These findings highlight the importance of considering both thermodynamic equilibrium and cooling paths when interpreting phase assemblages in post-mortem analyses. In particular, phases formed during cooling should not be directly associated with high-temperature stability or protective behavior. This distinction is essential for the accurate assessment of corrosion mechanisms.

REFERENCES

[1] BRANDVIK, T.; WANG, Z.; RATVIK, A. P.; GRANDE, T. Investigation of spent refractory lining in an anode baking furnace. *Light Metals – The Minerals, Metals & Materials Series*, 2017, 1281–1288.

[2] ISO 20292:2009 – Materials for the production of primary aluminum – Dense refractory bricks – Determination of cryolite resistance, 2009.

[3] LAMBOTTE, G.; CHARTRAND, P. Thermodynamic modeling of the (Al_2O_3 + Na_2O), (Al_2O_3 + Na_2O + SiO_2), and (Al_2O_3 + Na_2O + AlF_3 + NaF) systems. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 57, 2013, 306–334.

[4] MADSEN, I.C.; FINNEY, R.J.; FLANN, R.C.A.; FROST, M.T.; WILSON, B.W. Quantitative Analysis of High-Alumina Refractories Using X-ray Powder Diffraction Data and the Rietveld Method. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(3), 1991, 619–624.

[5] MYSEN, B.O.; CODY, G.D.; SMITH, A. Solubility mechanisms of fluorine in peralkaline and meta-aluminous silicate glasses and in melts to magmatic temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 12, 2004, 2745–2769.

[6] NARANG, B.; RAJGIRE, S.; GUPTA, A.; SAHOO, M.; NAYAK, J. Investigation of refractory degradation in Hall–Héroult cell. *Light Metals – The Minerals, Metals & Materials Series*, 2019, 731–736.

[7] PONCSÁK, S.; GHERIBI, A. E.; KISS, L. I.; CHARTRAND, P.; GUÉRARD, S.; BILODEAU, J. F. Experimental determination of the thermal diffusivity of industrial grade synthetic cryolite between 200–850 °C and comparison with theoretical predictions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 1–20.

[8] PROSHKIN, A. V.; SIMAKOV, D. A. State of the art and trends in the development of base plate materials for aluminum electrolysis cells. *Refractories and Industrial Ceramics*, 46, 2, 2005, 104–109.

[9] SALEM, M. H. B.; SOUCY, G.; MARCEAU, D.; GODEFROY, A.; CHAREST, S. Review of the properties and degradation mechanism of refractories in aluminum reduction cells. *Metals*, 15, 278, 2025, 1–18.

[10] SILJAN, O. J.; SCHØNING, C.; GRANDE, T. State-of-the-art alumino-silicate refractories for Al electrolysis cells. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society*, 54, 2002, 46–55.

[11] SUTOPO, U.M.; DESFITRI, E.R.; HAYAKAWA, Y.; KAMBARA, S. Role of Mineral Oxides on Trace Elements Behavior during Pulverized Coal Combustion. *Minerals*, 11, 2021, 1270, 1-13.

[12] WEI, Z.; PENG, J.; WANG, Y.; LIU, K.; DI, Y.; SUN, T. Cathodic process of aluminum deposition in NaF–AlF_3–Al_2O_3 melts with low cryolite ratio. *Ionics*, 25, 2019, 1735–1745.

[13] YURKOV, A. Refractories for Aluminum. Electrolysis and the Cast House. 2nd ed., Cham: Springer, 2017, 286 p.

Capítulo 8

Nanocompósitos de hidroxiapatita revestida com quitosana em matriz de PLGA: caracterização e desempenho biológico

Lailla Daianna Soltau Missio Pinheiro
Marcelo Lovato Brum

Resumo: Este estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar nanocompósitos contendo hidroxiapatita (HA) e hidroxiapatita revestida com quitosana (HA/QT) dispersas em matriz polimérica de poli (DL-ácido lático-co-ácido glicólico) (PLGA), visando aplicações em engenharia de tecidos ósseos. A escolha desses materiais baseia-se na bioatividade da HA, na biodegradabilidade do PLGA e nas propriedades biológicas da quitosana, que, combinadas, podem favorecer o desempenho de biomateriais híbridos. A HA foi sintetizada por precipitação química utilizando $Ca(NO_3)_2$ como precursor, sendo posteriormente revestida com quitosana para obtenção de estruturas do tipo core-shell. Os compósitos foram incorporados à matriz de PLGA para formação de filmes, sendo caracterizados por difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho (FTIR) e microscopia óptica. A biocompatibilidade foi avaliada por ensaio de citotoxicidade (MTT) utilizando células mononucleares de sangue periférico humano. Os resultados de DRX confirmaram a formação de HA cristalina, sem alterações estruturais após o recobrimento com quitosana, enquanto os espectros de FTIR evidenciaram a presença dos diferentes componentes e indicaram interação predominantemente física entre as fases. As análises morfológicas demonstraram melhor dispersão das partículas nos sistemas contendo HA/QT, sugerindo maior compatibilidade entre as fases no compósito. Os ensaios de citotoxicidade indicaram ausência de efeito citotóxico para as amostras avaliadas. Dessa forma, os nanocompósitos desenvolvidos apresentam propriedades promissoras para aplicações biomédicas, especialmente em sistemas voltados à regeneração de tecidos ósseos.

Palavras-chave: Biomaterial, Co-Polímero, *Core-Shell*.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Conferência de Consenso em Biomateriais para Aplicações Clínicas de 1982 “Biomateriais são toda substância (exeto drogas) ou combinação de substâncias, de origem sintética ou natural, que durante um período de tempo indeterminado é utilizado como um todo ou parte integrante de um sistema para ampliação ou substituição de quaisquer tecidos, órgãos ou funções corporais” (Williams, 1987). Esses biomateriais podem ser produzidos por compostos cerâmicos, metálicos, poliméricos ou compósitos, muitas vezes podendo ser utilizados um ou mais desses materiais em uma mesma prótese, órtese ou implantes (Al-Shalawi *et al.*, 2023).

Os biomateriais têm desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias para regeneração e reparo de tecidos, especialmente em aplicações ósseas (Ferraz, 2024). No entanto, a obtenção de materiais que combinem simultaneamente biocompatibilidade, bioatividade, resistência mecânica adequada e taxa de degradação controlada ainda representa um desafio significativo na engenharia de tecidos (Ullah; Chen, 2020). Materiais metálicos, amplamente utilizados em fixações ósseas, frequentemente exigem procedimentos cirúrgicos adicionais para sua remoção, além de poderem induzir respostas inflamatórias devido à corrosão e liberação de íons (On *et al.*, 2020). Nesse contexto, biomateriais biodegradáveis e bioativos têm sido investigados como alternativas promissoras, capazes de atuar temporariamente no organismo e serem posteriormente absorvidos, eliminando a necessidade de intervenções secundárias (Wang *et al.*, 2023).

A hidroxiapatita (HA) destaca-se por sua elevada bioatividade e similaridade com o tecido ósseo, promovendo osteocondução, no entanto sua natureza cerâmica limita sua resistência mecânica e sua capacidade de processamento (Abdul Halim; Hussein; Kandar, 2021; George *et al.*, 2022). Por outro lado, polímeros biodegradáveis como o poli (DL-ácido lático-co-ácido glicólico) (PLGA) apresentam boa processabilidade e degradabilidade, mas carecem de bioatividade, o que restringe sua eficiência em aplicações ósseas (Gentile *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2023). A combinação entre HA e matrizes poliméricas tem sido explorada como estratégia para superar essas limitações. Nesse contexto, a modificação superficial da HA com quitosana surge como uma abordagem promissora, uma vez que esse biopolímero apresenta propriedades biológicas relevantes, incluindo atividade antimicrobiana e potencial de interação celular (Frumento; Talu, 2025). Estruturas do tipo core-shell podem favorecer a compatibilidade entre fases, melhorar a dispersão das partículas e potencializar o desempenho biológico dos compósitos (Chen *et al.*, 2019).

Apesar desses avanços, ainda existem lacunas relacionadas à estabilidade, dispersão e comportamento biológico desses sistemas híbridos, especialmente quando incorporados em matrizes de PLGA, limitando sua aplicação efetiva em engenharia de tecidos ósseos (Ait Said, *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2018). Diante disso, este estudo tem como objetivo desenvolver e caracterizar nanocompósitos contendo hidroxiapatita e hidroxiapatita revestida com quitosana dispersas em matriz de PLGA, avaliando suas propriedades físico-químicas e desempenho biológico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. SÍNTESE DOS NANOCOMPÓSITOS

A hidroxiapatita (HA) foi sintetizada por método de precipitação química a partir de duas soluções precursoras. A solução S1 foi preparada contendo ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de amônio (NH_4OH) e água destilada, enquanto a solução S2 foi preparada com nitrato de cálcio ($Ca(NO_3)_2$) dissolvido em água. As soluções foram misturadas sob agitação magnética constante por 1 h, utilizando agitador magnético (Fisatom, modelo 753A), promovendo a formação do precipitado. Em seguida, o material foi submetido a tratamento térmico em mufla (EDG Equipamentos 3000) a 700 °C por 2 h para obtenção da fase cristalina. A quitosana (QT) de baixa massa molar (Aldrich Chemistry) foi dissolvida em solução de ácido acético sob agitação contínua a aproximadamente 30 °C, obtendo-se uma solução a 2% ($m.m^{-1}$).

O polímero poli (DL-ácido lático-co-ácido glicólico) (PLGA) (PDLG 5004A, Purac Biomaterials) foi dissolvido em mistura de acetona e clorofórmio, sendo posteriormente espalhado sobre placa de vidro para formação de filme por evaporação do solvente.

Para a obtenção do sistema HA/QT, a HA foi inicialmente dispersa em etanol (96%) sob agitação em temperatura ambiente, seguida da adição da solução de quitosana. Após homogeneização, a mistura foi submetida a tratamento térmico em mufla com rampa de aquecimento de 100 °C por 1 h, 150 °C por 12 h e 160 °C por 30 min. Após resfriamento, o material foi triturado.

Os compósitos poliméricos foram preparados pela incorporação de HA, QT e HA/QT em solução de PLGA. Foram produzidos filmes contendo 0,2 g de HA, 0,2 g de QT e diferentes proporções de HA/QT (0,2 g e 0,05 g), visando posterior caracterização físico-química e biológica.

2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Os nanocompósitos foram então caracterizadas por difração de raios X (DRX), utilizando difratômetro Bruker D2 Phaser, na faixa de 2θ de 5–90°, com análise dos dados realizada por meio do software DIFFRAC.EVA v3.0. A caracterização na região do infravermelho foi realizada por espectroscopia FTIR, utilizando o equipamento Spectrum One FTIR (PerkinElmer), na faixa espectral de 4000–500 cm^{-1}. A análise morfológica foi realizada por microscopia óptica, utilizando microscópio Meiji, com aumento de 40×, sendo as imagens capturadas com o sistema MShot Digital Imaging System.

2.3. ENSAIO DE CITOTOXICIDADE (MTT)

Para os testes de citotoxicidade, foram realizadas culturas primárias de células mononucleares de sangue periférico humano (CMSP) sobre a superfície das amostras, sendo a viabilidade celular avaliada por meio do ensaio de MTT. A atividade citotóxica foi determinada pelo método colorimétrico descrito por Mosmann (1983), baseado na redução do reagente MTT (cor amarela) a cristais de formazan (cor violácea) pela ação da enzima mitocondrial succinato desidrogenase. As células foram semeadas na concentração de 2×10^5 células/mL em placas de 24 poços, contendo meio de cultura e as respectivas amostras. Como controle positivo, foi utilizado peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 100 mM em meio de cultura, enquanto o controle negativo consistiu apenas de células em meio de cultura. As placas foram incubadas em estufa com atmosfera de 5% de CO_2 a 37 °C por 24 h.

2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

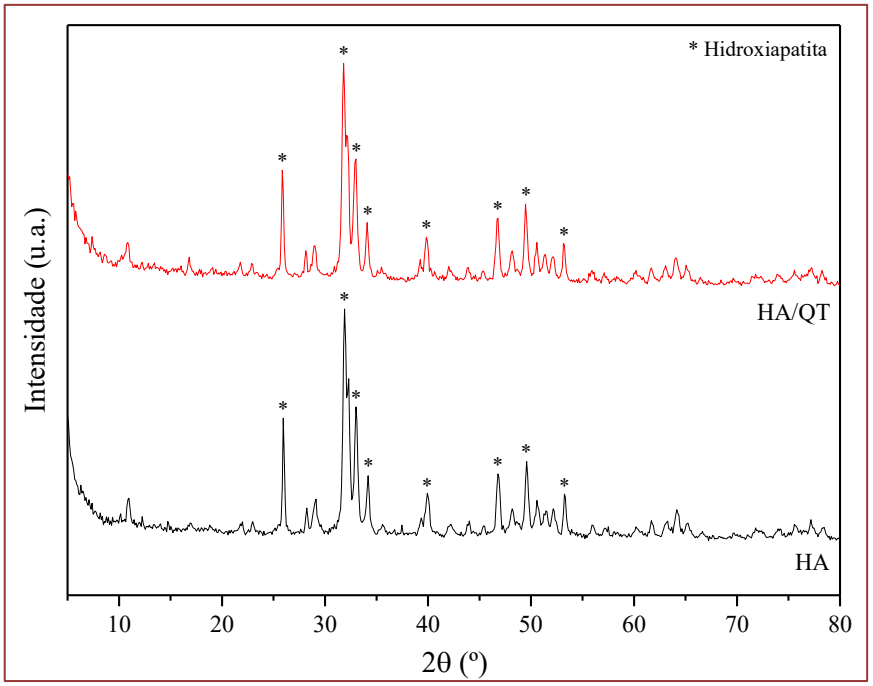
As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software GraphPad Prism (versão 5.0). Os dados foram expressos como média ± desvio padrão (DP), sendo os experimentos conduzidos em triplicata. As comparações entre os grupos foram realizadas por análise de variância (ANOVA) de uma via, seguida dos testes post hoc de Dunnett e Tukey. Foram considerados estatisticamente significativos valores de $p < 0,05$ (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

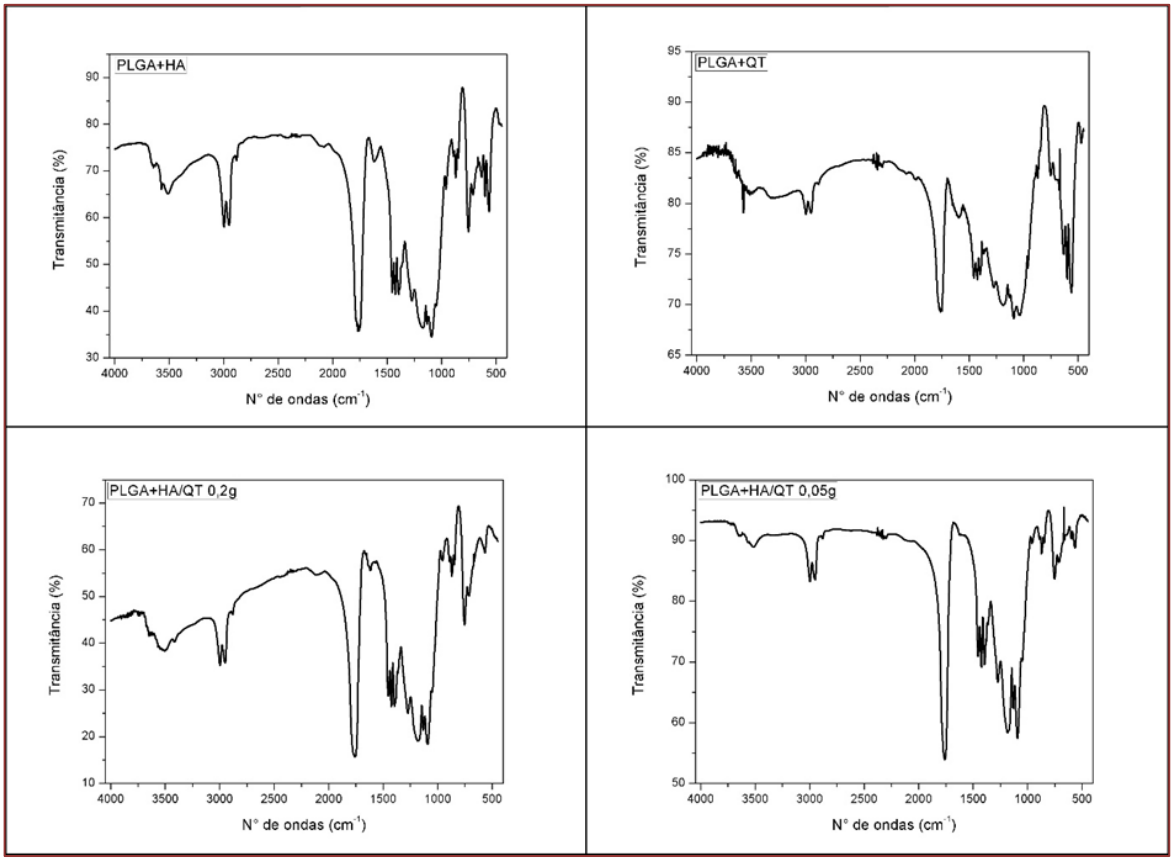
A análise por difração de raios X (DRX) foi realizada nas amostras de HA e HA/QT, conforme apresentado na Figura 2. Para a hidroxiapatita (HA), foram observados picos característicos em valores de 2θ próximos a 25,8°, 31,8°, 32,8° e 34,0°, correspondentes aos planos cristalográficos (002), (211), (300) e (202), respectivamente, compatíveis com o padrão cristalino da HA segundo a ficha JCPDS 09-0432. Esses resultados indicam a formação de uma fase pura e bem cristalina.No caso da amostra HA/QT, o difratograma apresentou perfil semelhante ao da HA pura, sem alterações significativas na posição ou intensidade dos picos de difração. Esse comportamento indica que o revestimento com quitosana não comprometeu a estrutura cristalina da hidroxiapatita, sugerindo que a modificação ocorreu predominantemente na superfície das partículas. A ausência de novos picos ou deslocamentos relevantes reforça a formação de um sistema do tipo *core-shell*, no qual a quitosana atua como uma camada superficial sem alterar a fase cristalina da HA, resultado consistente com estudos reportados na literatura (Shah *et al.*, 2022; Predoi *et al.*, 2025; El Kaim Billah *et al.*, 2023).

Figura 1 - Difratogramas de raios X (DRX) das amostras de hidroxiapatita (HA) e hidroxiapatita revestida com quitosana (HA/QT)



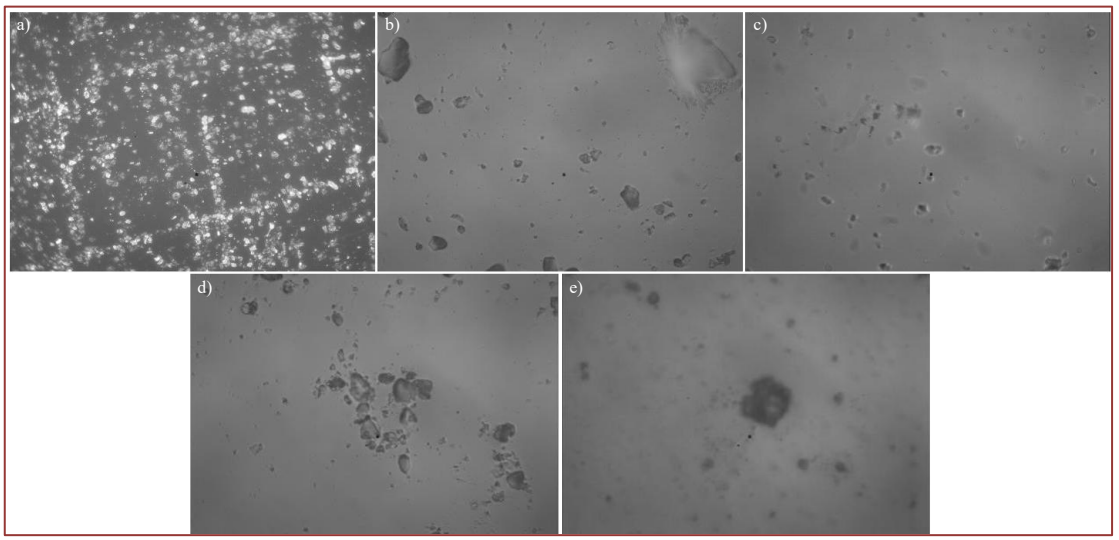
A análise dos espectros FTIR dos compósitos (Figura 2) evidencia a presença simultânea das bandas características do polímero e da fase cerâmica. Na Figura 2(a), correspondente ao sistema PLGA+HA, observam-se as bandas típicas do PLGA em 2997–2965 cm^{-1} (CH_2 e CH_3), 1759 cm^{-1} (C=O), 1360–1450 cm^{-1} (CH_3) e 750 cm^{-1} (CH), além das bandas associadas à hidroxiapatita, como o estiramento do grupo fosfato em torno de 1000 cm^{-1} e a presença de carbonato próximo a 1650 cm^{-1} (Tazibt *et al.*, 2023). Para o sistema PLGA+QT (Figura 2b), verifica-se a sobreposição das bandas do copolímero com aquelas características da quitosana, destacando-se as vibrações de amida I (1661–1671 cm^{-1}), deformação de N–H (1583–1594 cm^{-1}) e bandas associadas a grupos CH_3 (1380–1383 cm^{-1}), indicando a incorporação da quitosana na matriz polimérica (Duskey *et al.*, 2020). Os nanocompósitos PLGA+HA/QT 0,2g e PLGA+HA/QT 0,05g (Figura 2c e 2d) apresentam distribuição de bandas semelhante à observada no nanocompósito PLGA+HA (Figura 2a), evidenciando a presença do compósito na matriz de PLGA e indicando que a incorporação não alterou significativamente as características estruturais dos componentes. A ausência de deslocamentos significativos nas bandas sugere interação predominantemente física entre os componentes.

Figura 2 - Espectro na região do infravermelho dos compósitos poliméricos (a) PLGA+HA, (b) PLGA+QT, (c) PLGA+HA/QT 0,2g e (d) PLGA+HA/QT 0,05g



As imagens de microscopia óptica das amostras estão apresentadas na Figura 3. A superfície do polímero puro (Figura 3a) apresenta morfologia homogênea, sem a presença de fases distintas. No sistema PLGA+HA (Figura 3b), observa-se a presença de regiões mais brilhantes associadas à fase cristalina da hidroxiapatita, indicando sua dispersão na matriz polimérica. Para o sistema PLGA+QT (Figura 3c), verifica-se a presença de regiões heterogêneas, com áreas de maior concentração de quitosana, evidenciando a formação de aglomerados. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza catiônica da quitosana, que favorece interações intermoleculares e consequente agregação. Já os nanocompósitos PLGA+HA/QT 0,2g (Fig. 3d) e PLGA+HA/QT 0,05g (Fig. 3e) apresentam distribuição mais homogênea das fases na matriz polimérica, indicando melhor dispersão do compósito quando comparado aos sistemas individuais. Esse resultado sugere que a estrutura do tipo core-shell contribui para a compatibilidade entre os componentes e favorece a dispersão das partículas no polímero (Fernández-Álvarez *et al.*, 2021).

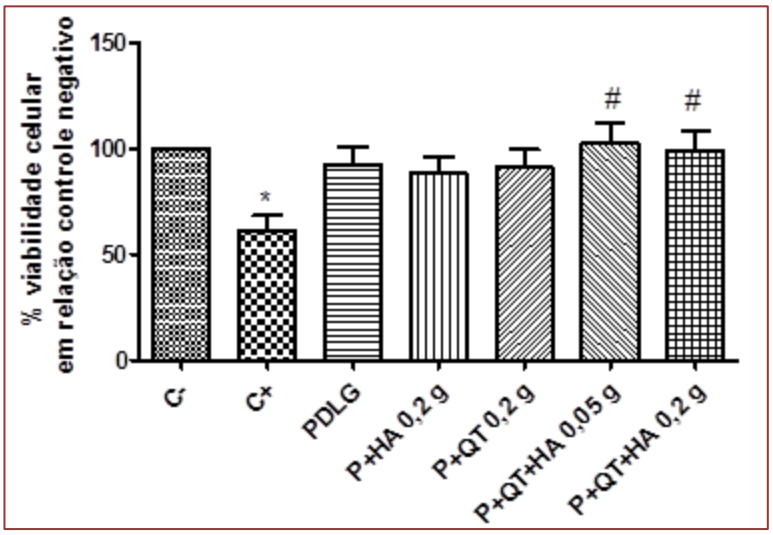
Figura 3 - Imagens de microscopia óptica dos nanocompósitos (a) PLGA, (b)PLGA+HA, (c) PLGA+QT, (d) PLGA+HA/QT 0,2 g e (e) PLGA+HA/QT 0,05 g



3.2. ENSAIO DE CITOTOXICIDADE (MTT)

Os resultados do ensaio de citotoxicidade pelo método de MTT são apresentados na Figura 4. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as amostras e o controle negativo ($p > 0,05$), indicando que os materiais avaliados não exerceram efeito citotóxico sobre células mononucleares de sangue periférico humano. De modo geral, as amostras apresentaram níveis de viabilidade celular semelhantes entre si e comparáveis ao controle, sem redução significativa, o que sugere que a incorporação de hidroxiapatita e quitosana à matriz polimérica não compromete a biocompatibilidade do sistema. Esses achados reforçam o potencial dos compósitos desenvolvidos para aplicações biomédicas, especialmente em estratégias voltadas à regeneração tecidual (Stockert *et al.*, 2018).

Figura 4 - Viabilidade celular avaliada pelo ensaio de MTT para as amostras de PLGA, PLGA+HA, PLGA+QT e PLGA+HA/QT após 24 h de incubação com células mononucleares de sangue periférico humano



4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram desenvolvidos nanocompósitos à base de hidroxiapatita (HA) e hidroxiapatita revestida com quitosana (HA/QT) dispersos em matriz polimérica de PLGA, visando aplicações em biomateriais. Os resultados de caracterização por DRX e FTIR confirmaram a formação da fase cristalina da HA e a presença dos diferentes componentes nos compósitos, sem alterações estruturais significativas, indicando a formação de sistemas do tipo *core-shell*. As imagens de microscopia indicaram que os sistemas contendo HA/QT apresentaram melhor dispersão na matriz polimérica em comparação aos sistemas individuais. Esses resultados sugerem que a modificação superficial da HA com quitosana favorece a compatibilidade entre as fases.

Os ensaios biológicos demonstraram ausência de citotoxicidade e adequada adesão celular, indicando a biocompatibilidade dos materiais desenvolvidos. Destaca-se que os compósitos contendo HA/QT apresentaram desempenho superior em termos de adesão celular, especialmente na menor concentração avaliada.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que os nanocompósitos desenvolvidos apresentam potencial para aplicações em engenharia de tecidos ósseos, contribuindo para o desenvolvimento de biomateriais que possam atuar na regeneração óssea sem a necessidade de intervenções secundárias.

REFERÊNCIAS

[1] ABDUL HALIM, Nur Akma; HUSSEIN, Mohd Zobir; KANDAR, Mohd Khairuddin. Nanomaterials-upconverted hydroxyapatite for bone tissue engineering and a platform for drug delivery. **International Journal of Nanomedicine**, p. 6477-6496, 2021.

[2] AIT SAID, H. *et al.* Manufacturing methods, properties, and potential applications in bone tissue regeneration of hydroxyapatite-chitosan biocomposites: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 243, p. 125150, 2023.

[3] AL-SHALAWI, Faisal Dakhelallah *et al.* Biomaterials as implants in the orthopedic field for

regenerative medicine: metal versus synthetic polymers. **Polymers**, v. 15, n. 12, p. 2601, 2023.

[4] CHEN, Peng *et al.* Biomimetic composite scaffold of hydroxyapatite/gelatin-chitosan core-shell nanofibers for bone tissue engineering. **Materials Science and Engineering: C**, v. 97, p. 325-335, 2019.

[5] DUSKEY, Jason Thomas *et al.* Investigating novel syntheses of a series of unique hybrid PLGA-chitosan polymers for potential therapeutic delivery applications. **Polymers**, v. 12, n. 4, p. 823, 2020.

[6] EL KAIM BILLAH, Rachid *et al.* A novel chitosan/nano-hydroxyapatite composite for the adsorptive removal of Cd (II) from aqueous solution. **Polymers**, v. 15, n. 6, p. 1524, 2023.

[7] FERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, Fátima *et al.* Engineering of stealth (maghemite/PLGA)/chitosan (core/shell)/shell nanocomposites with potential applications for combined MRI and hyperthermia against cancer. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 9, n. 24, p. 4963-4980, 2021.

[8] FERRAZ, Maria Pia. An overview on the big players in bone tissue engineering: biomaterials, scaffolds and cells. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 7, p. 3836, 2024.

[9] FRUMENTO, Davide; ȚĂLU, Ștefan. Immunomodulatory potential and biocompatibility of chitosan–hydroxyapatite biocomposites for tissue engineering. **Journal of Composites Science**, v. 9, n. 6, p. 305, 2025.

[10] GENTILE, Piergiorgio *et al.* An overview of poly (lactic-co-glycolic) acid (PLGA)-based biomaterials for bone tissue engineering. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 3, p. 3640-3659, 2014.

[11] GEORGE, Suchi Mercy *et al.* Multifunctional hydroxyapatite composites for orthopedic applications: a review. **ACS biomaterials science & engineering**, v. 8, n. 8, p. 3162-3186, 2022.

[12] LU, Yue *et al.* Properties of poly (lactic-co-glycolic acid) and progress of poly (lactic-co-glycolic acid)-based biodegradable materials in biomedical research. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 3, p. 454, 2023.

[13] MOSMANN, T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays. Journal of immunological methods, v. 65, n. 1-2, p. 55-63, 1983.

[14] ON, Sung-Woon *et al.* Bioabsorbable osteofixation materials for maxillofacial bone surgery: A review on polymers and magnesium-based materials. **Biomedicines**, v. 8, n. 9, p. 300, 2020.

[15] PREDOI, Daniela *et al.* Development and Physico-Chemical and Antibacterial Characterization of Chromium-Doped Hydroxyapatite in a Chitosan Matrix Coating. **Polymers**, v. 17, n. 19, p. 2633, 2025.

[16] SHAH, Sambridhi *et al.* Microstructural analysis of biowaste-derived hydroxyapatite-chitosan nanocomposites. **Micro & Nano Letters**, v. 17, n. 13, p. 369-376, 2022.

[17] STOCKERT, Juan C. *et al.* Tetrazolium salts and formazan products in Cell Biology: Viability assessment, fluorescence imaging, and labeling perspectives. Acta histochemica, v. 120, n. 3, p. 159-167, 2018.

[18] TAZIBT, Nedjma *et al.* Effect of filler content on the morphology and physical properties of poly (lactic acid)-hydroxyapatite composites. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 809, 2023.

[19] THANGARAJU, Pugazhenthan; VARTHYA, Shoban Babu. ISO 10993: biological evaluation of medical devices. In: Medical device guidelines and regulations handbook. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 163-187.

[20] ULLAH, Saleem; CHEN, Xin. Fabrication, applications and challenges of natural biomaterials in tissue engineering. **Applied Materials Today**, v. 20, p. 100656, 2020.

[21] WANG, Pei *et al.* Biodegradable implants for internal fixation of fractures and accelerated bone regeneration. **ACS omega**, v. 8, n. 31, p. 27920-27931, 2023.

[22] WILLIAMS, David Franklyn (Ed.). **Progress in biomedical engineering: definitions in biomaterials**. Elsevier, 1987.

[23] YANG, Ying *et al.* Dual-functional 3D-printed composite scaffold for inhibiting bacterial infection and promoting bone regeneration in infected bone defect models. **Acta biomaterialia**, v. 79, p. 265-275, 2018.

Capítulo 9

Utilização de vegetais típicos da Amazônia para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis: uma revisão bibliográfica das publicações nos últimos dez anos

Dewid Bruno da Silva Dias
Fernando Nunes da Silva

Resumo: Este artigo faz um levantamento da utilização de vegetais da Amazônia na produção de biolubrificantes e biocombustíveis, destacando suas propriedades físico-químicas e o potencial sustentável em comparação aos óleos convencionais derivados do petróleo. A pesquisa teórica abrange plantas oleaginosas como andiroba, buriti, copaíba e castanha-do-pará, evidenciando vantagens como biodegradabilidade, estabilidade térmica e desempenho técnico. Embora apresentem benefícios ambientais significativos e oportunidades econômicas, desafios como a infraestrutura inadequada e os custos de produção ainda precisam ser superados. A exploração sustentável desses recursos é fundamental para garantir a preservação da biodiversidade amazônica, contribuindo para um futuro mais sustentável e alinhado às demandas por alternativas renováveis.

Palavras-chave: Fontes vegetais, Propriedades físico-químicas, Plantas oleaginosas, Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por fontes de energia e insumos industriais sustentáveis está crescendo à medida que a sociedade se torna mais consciente das limitações dos combustíveis fósseis e de seu impacto ambiental. Entre os insumos mais críticos para o funcionamento de máquinas e sistemas mecânicos estão os óleos lubrificantes e os combustíveis (Macedo *et al*., 2023; Farias *et al*., 2023).

Os lubrificantes desempenham um papel essencial na redução do atrito e desgaste entre componentes móveis, aumentando a eficiência e a durabilidade de motores e máquinas. Já os combustíveis fornecem a energia necessária para o funcionamento de motores de combustão interna, tanto em veículos quanto em equipamentos industriais (Rios, 2021; Andrade, 2023).

Historicamente, os óleos lubrificantes e combustíveis têm sido derivados do petróleo, um recurso não renovável com implicações ambientais consideráveis, tanto na extração quanto no uso. O processo de refino gera subprodutos poluentes e sua combustão libera gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global (Zugaib, 2023; Leite, 2023).

Em contrapartida, os biolubrificantes e biocombustíveis, derivados de fontes vegetais, surgem como alternativas mais ecológicas. Esses produtos são obtidos a partir de óleos vegetais, que são renováveis, biodegradáveis e, em muitos casos, apresentam propriedades técnicas comparáveis ou superiores aos derivados de petróleo (Forezi, 2023; Silva *et al*., 2024).

No contexto da produção de óleos lubrificantes e combustíveis, as plantas oleaginosas são fontes primárias de matéria-prima. Oleaginosas são plantas que acumulam grandes quantidades de óleo em suas sementes, frutos ou polpas, de acordo com a Tabela 1, tem-se os principais óleos vegetais potencialmente utilizados (Mafuani, 2023).

Tabela 1 – Ácidos graxos importantes em óleos vegetais

Nome comum	Fórmula Molecular	Tipo de ácido graxo
Ácido palmítico	$C_{16} H_{32} O_2$	Saturado
Ácido esteárico	$C_{18} H_{36} O_2$	Saturado
Ácido oleico	$C_{18} H_{34} O_2$	Monoinsaturado
Ácido linoleico	$C_{18} H_{32} O_2$	Diinsaturado
Ácido linolênico	$C_{18} H_{30} O_2$	Triinsaturado
Ácido ricinoleico	$C_{18} H_{34} O_3$	Ácido graxo insaturado

Fonte: Reeves (2017); Greco-Duarte (2017).

O Brasil, com destaque para a região amazônica, possui uma grande diversidade de plantas oleaginosas, muitas delas ainda pouco exploradas comercialmente. A Amazônia, como maior floresta tropical do mundo, abriga uma ampla gama de espécies com potencial para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis, o que a coloca no centro de pesquisas que buscam alternativas para o desenvolvimento sustentável (Santos, 2024; Forezi, 2023).

Entre as plantas oleaginosas da Amazônia, algumas das mais promissoras para a produção de óleos lubrificantes e combustíveis são, por exemplo, a andiroba, o buriti e a copaíba.

Amplamente conhecida na região amazônica, a andiroba (*Carapa guianensis*), Figura 1, é uma árvore cujas sementes possuem um óleo rico em ácidos graxos insaturados. Esse óleo é tradicionalmente utilizado como repelente e para fins medicinais, mas suas propriedades o tornam adequado para a formulação de biolubrificantes devido à sua estabilidade térmica e resistência à oxidação (Silva, 2023a; Abreu *et al.*, 2024; Silva, 2023b).

Figura 1 – Andiroba (*Carapa guianensis*)

Fonte: De Souza (2006).

O buriti (*Mauritia flexuosa*), Figura 2, é uma palmeira encontrada em áreas alagadas da Amazônia. Seu óleo, extraído do mesocarpo do fruto, apresenta alta concentração de ácidos graxos e uma coloração avermelhada devido à presença de carotenoides. O óleo de buriti possui excelente capacidade antioxidante, tornando-o ideal para aplicações em biolubrificantes, além de ser potencialmente utilizável como óleo combustível em motores de combustão (Silva, 2023a; Santiago, 2023; Vidal, 2023).

Figura 2 – Buriti (*Mauritia flexuosa*)

Fonte: Sampaio *et al.* (2011).

A copaíba (*Copaifera langsdorffii*), Figura 3, é uma árvore nativa da Amazônia que exsuda um óleo-resina conhecido como "óleo de copaíba". Esse óleo é rico em compostos terpenoides e possui propriedades anti-inflamatórias, além de ser tradicionalmente usado em tratamentos medicinais. Na indústria, seu óleo tem sido estudado como biocombustível, dada sua capacidade de combustão limpa e alta densidade energética (Silva, 2023b; Pascoal, 2021; Forezi, 2023; Andrade, 2024).

Figura 3 – Copaíba (*Copaifera langsdorffii*)

Fonte: Rigamonte-Azevedo (2004).

As propriedades físico-químicas desses óleos vegetais são fatores determinantes para sua aplicação na indústria de lubrificantes e combustíveis. As principais propriedades medidas incluem:

Viscosidade: A viscosidade de um óleo é a medida de sua resistência ao fluxo. Nos lubrificantes, a viscosidade é crucial para garantir uma camada de proteção adequada entre superfícies metálicas. Óleos com maior viscosidade tendem a proporcionar uma melhor proteção contra o desgaste, enquanto óleos com menor viscosidade reduzem a resistência ao movimento (Depiante, 2023; Amorim, 2023; Meira, 2021).

Índice de Viscosidade (IV): Este índice mede a variação da viscosidade de um óleo em função da temperatura. Um alto IV é desejável em biolubrificantes, pois indica que o óleo mantém suas propriedades de lubrificação mesmo sob variações térmicas significativas, garantindo eficiência tanto em temperaturas baixas quanto em altas (Rios, 2021; De Abreu *et al.*, 2023).

Estabilidade Térmica e Oxidativa: Óleos vegetais com boa estabilidade térmica e resistência à oxidação são mais duráveis e adequados para uso em sistemas mecânicos que operam em condições severas. A oxidação reduz a vida útil do lubrificante, enquanto a estabilidade térmica garante que o óleo não se decompõe facilmente em altas temperaturas (Mauss, 2020; Mendonça *et al.*, 2020).

Ponto de Fulgor: O ponto de fulgor é a temperatura mínima na qual o vapor do óleo pode inflamar-se em contato com uma fonte de ignição. Para os combustíveis, essa propriedade é crítica, pois influencia a segurança e o manuseio durante o transporte e armazenamento (Oliveira *et al.*, 2021).

A utilização de óleos vegetais da Amazônia oferece uma série de benefícios ambientais e econômicos. Além de serem renováveis e biodegradáveis, esses óleos podem reduzir significativamente a emissão de gases poluentes quando usados como combustíveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Em lubrificantes, esses óleos proporcionam menor toxicidade e melhor desempenho em sistemas mecânicos, aumentando a vida útil dos equipamentos (Gaertner, 2024; Gonçalves, 2024).

Este estudo, portanto, visa explorar de maneira detalhada o potencial das plantas oleaginosas amazônicas para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis, por meio de uma revisão bibliográfica dos trabalhos publicados nos últimos dez anos. Fazendo, dessa forma, uma análise aprofundada das propriedades físico-químicas dos óleos extraídos dessas plantas, bem como, de suas viabilidades técnicas e econômicas.

2. METODOLOGIA

Este trabalho se caracteriza como uma pesquisa teórica com o objetivo de explorar e analisar o potencial de vegetais provenientes da Amazônia na produção de biolubrificantes e biocombustíveis. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, focando em artigos científicos, livros, trabalhos acadêmicos (teses, dissertações e monografias) e documentos técnicos que tratam da produção de óleos lubrificantes e combustíveis a partir de fontes vegetais, com ênfase nas plantas oleaginosas da região amazônica, publicados nos últimos dez anos.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico em bases de dados científicas reconhecidas, como Scielo, Google Scholar, ScienceDirect, Periódicos CAPES e periódicos especializados em engenharia, sustentabilidade e química de óleos vegetais. O objetivo foi identificar estudos que abordassem a utilização de plantas oleaginosas para a produção de óleos lubrificantes e combustíveis, com especial atenção às espécies amazônicas.

As referências foram selecionadas com base na relevância e qualidade dos estudos, priorizando aqueles que ofereciam dados técnicos sobre as propriedades físico-químicas dos óleos vegetais. Foram incluídos trabalhos que discutem a composição química de óleos como o de andiroba, buriti, copaíba e castanha-do-pará, além de suas aplicações industriais e seu desempenho como biolubrificantes e biocombustíveis.

A pesquisa envolveu uma análise comparativa entre as propriedades dos óleos vegetais amazônicos e os óleos lubrificantes e combustíveis convencionais derivados de petróleo. Foram considerados fatores como viscosidade, índice de viscosidade, ponto de fulgor, estabilidade térmica e oxidativa, e biodegradabilidade. A análise teve como objetivo verificar a viabilidade técnica de utilização desses óleos vegetais em sistemas mecânicos e motores de combustão.

Foram estudadas as principais plantas oleaginosas da Amazônia, incluindo suas características biológicas e ecológicas, além das técnicas de extração e aproveitamento de seus óleos. O estudo envolveu a pesquisa de seus nomes populares e científicos, abordando a diversidade de espécies disponíveis e seu potencial para uso industrial.

Além dos aspectos técnicos, a pesquisa considerou as barreiras e oportunidades econômicas para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis em larga escala. Foram discutidos fatores como a infraestrutura necessária, o custo de produção, a logística de transporte na região amazônica e as políticas públicas voltadas à sustentabilidade. A viabilidade econômica e a conservação ambiental também foram temas centrais para a discussão.

Dessa forma, a metodologia adotada permitiu um exame abrangente do estado da arte sobre o uso de vegetais da Amazônia para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis. Os dados levantados e analisados forneceram subsídios para as discussões e conclusões que serão apresentadas nas seções seguintes deste trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados desta pesquisa foi baseada em uma avaliação teórica das propriedades físico-químicas dos óleos vegetais extraídos das plantas oleaginosas da Amazônia, comparando-os com os óleos lubrificantes e combustíveis convencionais de origem petroquímica. Os dados foram obtidos de estudos científicos que analisaram detalhadamente as características dos óleos de plantas como andiroba, buriti e copaíba.

3.1. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS ÓLEOS VEGETAIS

Os óleos vegetais provenientes da Amazônia apresentam características promissoras para o uso industrial, especialmente na produção de biolubrificantes e biocombustíveis. As principais propriedades analisadas incluem a viscosidade, o índice de viscosidade, a estabilidade térmica e oxidativa, o ponto de fulgor e a biodegradabilidade. Essas propriedades foram comparadas com as dos óleos derivados de petróleo para avaliar sua viabilidade técnica.

3.2. VISCOSIDADE E ÍNDICE DE VISCOSIDADE (IV)

A viscosidade e o índice de viscosidade (IV) são propriedades fundamentais na avaliação de lubrificantes, influenciando diretamente sua estabilidade e desempenho em diferentes condições térmicas. Os óleos vegetais da Amazônia, como o óleo de andiroba (*carapa guianensis*) e o óleo de buriti (*mauritia flexuosa*), apresentam índices de viscosidade que variam entre 190 a 210 e 160 a 180, respectivamente. Esses valores são significativamente superiores aos dos óleos minerais convencionais (IV de 90 a 120) e comparáveis aos dos óleos sintéticos (IV de 150 a 200). A alta estabilidade térmica dos óleos amazônicos indica menor variação de fluidez em diferentes temperaturas, tornando-os adequados para aplicações industriais que exigem operação estável sob condições severas. Adicionalmente, o óleo de andiroba destaca-se por sua viscosidade adequada ao uso em lubrificantes industriais, enquanto o óleo de buriti, com um IV competitivo, é igualmente promissor. Tais características colocam os óleos vegetais como alternativas viáveis e sustentáveis aos lubrificantes derivados de combustíveis fósseis, especialmente em aplicações que demandam resistência térmica e baixo impacto ambiental (Macedo *et al.*, 2023; Forezi, 2023; Cavalcante *et al*., 2021).

3.3. ESTABILIDADE TÉRMICA E OXIDATIVA

A estabilidade térmica e a resistência à oxidação dos óleos vegetais da Amazônia destacam-se como fatores cruciais para sua aplicação como biolubrificantes. O óleo de copaíba (*copaifera sp.*), por exemplo, apresentou um Tempo de Indução à Oxidação (TIO) de aproximadamente 8 a 12 horas, enquanto lubrificantes minerais convencionais registram valores entre 4 e 6 horas, indicando uma resistência à oxidação até 50% superior. Essa propriedade contribui para a maior durabilidade e eficiência dos sistemas mecânicos, especialmente sob condições de alta temperatura e pressão. Essa elevada estabilidade é atribuída à presença de compostos antioxidantes naturais, como os terpenoides, que retardam a degradação oxidativa do óleo. Tais características tornam o óleo de copaíba uma alternativa sustentável e tecnicamente viável, particularmente em aplicações industriais que demandam maior resistência térmica e menor impacto ambiental (Santos, 2024; Mendonça *et al.*, 2020).

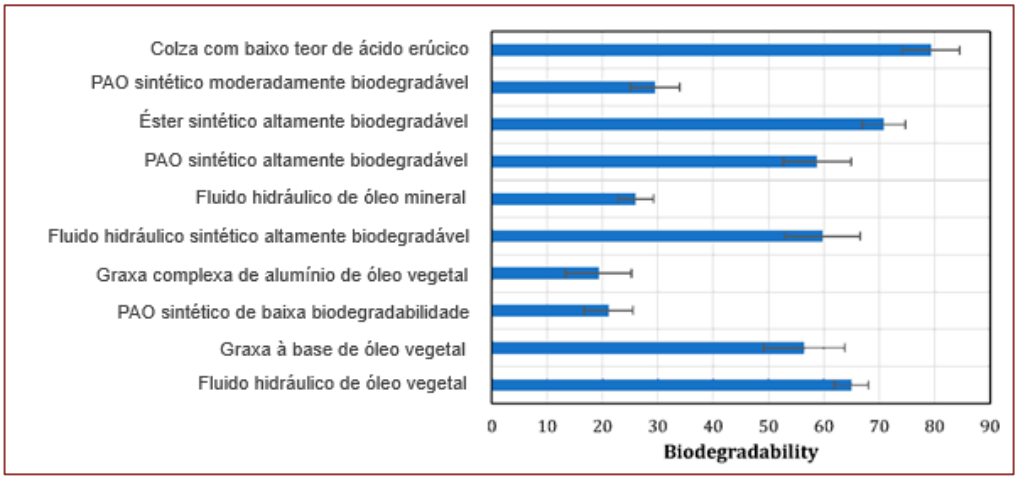
3.4. PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor, que reflete a segurança no manuseio de combustíveis, foi satisfatório nos óleos de buriti (*mauritia flexuosa*) e castanha-do-pará (*bertholletia excelsa*), ambos apresentando valores superiores aos combustíveis fósseis tradicionais. O óleo de buriti registrou um ponto de fulgor entre 260°C e 280°C, enquanto o da castanha-do-pará variou entre 250°C e 270°C, em contraste com os valores de 50°C a 70°C do diesel convencional. Esses resultados indicam que os biocombustíveis derivados dessas plantas oferecem maior segurança operacional, reduzindo significativamente o risco de ignição acidental durante o transporte e o armazenamento (Oliveira *et al*., 2021; Vidal, 2023).

3.5. BIODEGRADABILIDADE

Uma das maiores vantagens dos óleos vegetais sobre os lubrificantes derivados de petróleo é sua biodegradabilidade. Os óleos amazônicos, como o óleo de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) e o óleo de buriti (*Mauritia flexuosa*), demonstraram altas taxas de degradação natural quando expostos ao ambiente, com valores variando entre 85% e 90% para o óleo de castanha-do-pará e entre 80% e 88% para o óleo de buriti em um período de 28 dias. Níveis de degradação semelhantes ao lubrificante do vegetal colza com baixo teor de ácido erúcico (*low erucic acid rapeseed*) (Figura 4). Agora, em comparação, aos lubrificantes derivados de petróleo que apresentam taxas significativamente menores, entre 15% e 30%**.** Essa diferença reduz consideravelmente o impacto ambiental, especialmente em casos de derramamento ou descarte inadequado, reforçando a sustentabilidade dos óleos vegetais (Gaertner, 2024; Silva, 2023b; Monte, 2021).

Figura 4 – Biodegradabilidade de diferentes bases lubrificantes conforme ASTM D5864



Fonte: Narayana Sarma e Vinu (2022).

3.6. COMPARAÇÃO COM ÓLEOS DE ORIGEM PETROQUÍMICA

Os óleos vegetais, em geral, oferecem uma alternativa viável aos derivados de petróleo, tanto em termos de desempenho técnico quanto em sustentabilidade ambiental. Embora alguns óleos vegetais apresentem viscosidade inferior em temperaturas elevadas, como 7 a 10 cSt a 100°C, em comparação com os óleos minerais derivados de petróleo, que variam entre 10 e 15 cSt na mesma temperatura, essa desvantagem pode ser mitigada por meio de processos de modificação química, como a transesterificação. Esses processos melhoram as propriedades térmicas e reológicas dos óleos, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações industriais. Além disso, os biolubrificantes e biocombustíveis amazônicos destacam-se pela ausência de compostos tóxicos em sua composição, o que reduz a contaminação do solo e dos corpos d'água, em contraste com os óleos petroquímicos, que possuem altos níveis de toxicidade e são altamente poluentes (Zugaib, 2023; Silva, 2023a; Almeida, 2021).

3.7. POTENCIAL ECONÔMICO E AMBIENTAL

Do ponto de vista econômico, a produção de biolubrificantes e biocombustíveis a partir de plantas oleaginosas da Amazônia pode contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável da região. A exploração sustentável dessas plantas pode gerar empregos e incentivar a preservação ambiental, ao mesmo tempo em que oferece alternativas energéticas menos dependentes de fontes fósseis (Mafuani, 2023; Gonçalves, 2024). Por outro lado, os benefícios ambientais são inegáveis. O uso de biocombustíveis amazônicos pode reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa, liberando 30% a 50% menos CO_2 em comparação aos combustíveis fósseis. Além disso, a maior biodegradabilidade dos biolubrificantes ajuda a minimizar o impacto de resíduos industriais, promovendo uma operação mais limpa e sustentável (Almeida, 2021; Cavalcante *et al*., 2016).

3.8. DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Apesar das propriedades favoráveis e do grande potencial dessas oleaginosas, existem limitações que devem ser abordadas. Uma delas é o custo de produção dos óleos vegetais, que ainda é elevado em comparação aos derivados de petróleo. O custo de produção dos óleos amazônicos, como o óleo de castanha-do-pará e o óleo de buriti, varia entre R$ 10,00 e R$ 20,00 por litro, enquanto os óleos derivados de petróleo têm um custo de produção entre R$ 3,00 e R$ 5,00 por litro**.** A viabilidade econômica de utilizar óleos amazônicos em larga escala depende de investimentos em tecnologia e infraestrutura para melhorar os processos de extração e refino, além de políticas públicas que incentivem o uso de biolubrificantes e biocombustíveis no setor industrial (Gaertner, 2024; Andrade, 2024; Monte, 2021). Outro desafio está relacionado à disponibilidade de matéria-prima. Embora a Amazônia abrigue uma vasta quantidade de plantas oleaginosas, a exploração excessiva pode gerar desequilíbrios ecológicos. Portanto, é fundamental que as práticas de manejo sejam sustentáveis, garantindo que a produção desses óleos não prejudique a biodiversidade local (Maciel, 2021).

3.9. LACUNAS E PERSPECTIVAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao longo desta revisão, foram identificados avanços na caracterização físico-química e no desempenho dos biolubrificantes e biocombustíveis de origem vegetal. No entanto, ainda existem desafios a serem superados para viabilizar sua aplicação em larga escala.

Um dos principais entraves é a viabilidade econômica, uma vez que poucos estudos abordam os custos envolvidos em cada etapa da produção, desde a extração da matéria-prima até a modificação química para melhorar suas propriedades (Silva et al., 2022). Além disso, a ausência de regulamentações específicas dificulta investimentos e a inserção dos biolubrificantes no mercado, diretamente do biodiesel, que já conta com incentivos fiscais em diversos países (Ferreira, L., & Andrade, M., 2023).

A implementação de práticas sustentáveis na produção de biolubrificantes exige uma análise criteriosa do impacto ambiental ao longo de todo o processo produtivo. Fatores como o uso de solventes químicos, o alto consumo energético nas etapas industriais e a geração de resíduos precisam ser melhor investigados para garantir que a produção desses compostos seja realmente sustentável (Mendes et al., 2021). Além disso, a padronização das propriedades físico-químicas ainda representa um desafio, uma vez que as características dos biolubrificantes podem variar conforme a matéria-prima utilizada e o método de processamento adotado, o que pode dificultar sua aceitação em larga escala pela indústria (Ramos et al., 2023).

Além das questões econômicas e regulatórias, um aspecto técnico que ainda necessita de mais investigações é a realização de testes tribológicos para avaliar o desempenho dos biolubrificantes sob condições reais de atrito. Muitos estudos abordam as propriedades físico-químicas dos óleos vegetais, como viscosidade e estabilidade térmica, mas não testam a sua eficiência na redução do desgaste e do coeficiente de atrito em superfícies metálicas (Pereira et al., 2023). A ausência desses testes dificulta a aceitação dos biolubrificantes para aplicações industriais e automotivas, pois não há comprovação experimental suficiente de sua performance comparada aos lubrificantes convencionais. Dessa forma, futuras pesquisas devem considerar não apenas o desempenho técnico dos biolubrificantes e biocombustíveis, mas também sua viabilidade econômica, regulamentação e impacto ambiental, a fim de viabilizar sua aplicação em larga escala.

Além disso, a realização de ensaios tribológicos mais abrangentes, como testes de pino sobre disco e análise de desgaste por microscopia, será fundamental para validar sua eficiência e garantir maior confiabilidade no uso industrial e automotivo (Santos & Oliveira, 2024).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teórico abordou o potencial dos óleos vegetais provenientes de plantas oleaginosas da Amazônia para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis, com uma análise comparativa em relação aos óleos convencionais de origem petroquímica. A partir da revisão bibliográfica e da análise das propriedades físico-químicas dos óleos de espécies como a andiroba, buriti, copaíba e castanha-do-pará, concluiu-se que essas plantas oferecem uma alternativa viável e sustentável para a indústria de lubrificantes e combustíveis.

Os óleos vegetais amazônicos se destacaram por suas propriedades técnicas, especialmente em relação à viscosidade, estabilidade térmica e oxidativa, e biodegradabilidade, fatores essenciais para a aplicação industrial. Além disso, a produção de biolubrificantes e biocombustíveis a partir dessas fontes tem o potencial de reduzir significativamente o impacto ambiental, tanto pela menor emissão de gases de efeito estufa quanto pela maior biodegradabilidade em relação aos derivados de petróleo.

Do ponto de vista econômico e social, o desenvolvimento dessa cadeia produtiva pode contribuir para a geração de empregos e renda nas comunidades amazônicas, incentivando a preservação ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais. No entanto, desafios como a infraestrutura inadequada e os custos elevados de produção ainda precisam ser enfrentados para que esses produtos se tornem competitivos no mercado global.

Ademais, é essencial que a exploração das plantas oleaginosas seja feita de forma sustentável, garantindo que a biodiversidade da Amazônia seja preservada e que os impactos negativos sobre o ecossistema sejam minimizados. Políticas públicas que incentivem a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e o uso de biolubrificantes e biocombustíveis são fundamentais para o avanço dessa indústria.

Os biolubrificantes e biocombustíveis vegetais mostram grande potencial sustentável, mas ainda enfrentam desafios para sua ampla adoção. A viabilidade econômica continua sendo um entrave, devido aos altos custos de produção e à falta de incentivos específicos, dificultando sua competitividade com os derivados do petróleo. Além disso, a ausência de regulamentações claras impacta os investimentos e a inserção desses produtos no mercado. Outro fator crítico é a necessidade de estudos sobre a sustentabilidade do processo produtivo, considerando o impacto ambiental da extração, modificação e descarte desses compostos. Além disso, a padronização das propriedades físico-químicas e a realização de testes tribológicos são fundamentais para validar sua eficiência em aplicações industriais e automotivas. Portanto, futuras pesquisas devem focar na otimização dos processos produtivos, no desenvolvimento de políticas de incentivo e na realização de testes que garantam a confiabilidade e a viabilidade desses produtos em larga escala.

Em resumo, a utilização de vegetais provenientes da Amazônia para a produção de biolubrificantes e biocombustíveis representa uma alternativa promissora aos produtos de origem petroquímica, alinhando-se às demandas por tecnologias mais limpas e

sustentáveis. Contudo, para que essa alternativa se consolide em larga escala, é necessário superar os desafios técnicos e econômicos, além de promover um equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais e a preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

[1] ABREU, Laura Figueiredo et al. Qualidade oxidativa durante o armazenamento de sementes de andiroba beneficiadas para prensagem. 2024.

[2] ALMEIDA, Richard Manuel Batista. Novas oportunidades de aproveitamento do biogás no Brasil. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) -Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

[3] AMORIM, Beatriz Palacio de. Análise do mercado e desafios no refino de óleos lubrificantes automotivos. 2023.

[4] ANDRADE, Luana. Transparência site PROTEC. 2024.

[5] ANDRADE, Caio Mendonça de. DESGASTE DE PEÇAS METÁLICAS EM MOTORES ALIMENTADOS POR BIODIESEL OBTIDO POR MEIO DE ÓLEO RESIDUAL. 2023. Tese de Doutorado.

[6] CAVALCANTE, Glene Henrique Rodrigues et al. Estudo de óleos nativos da Amazônia (Babaçu e Andiroba): modificação química, caracterização e avaliação como biolubrificante. 2016.

[7] CECILIA, Juan Antonio et al. An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives. Processes, v. 8, n. 3, p. 257, 2020.

[8] DE ABREU, Leonardo Gomes et al. Óleo de babaçu: uma plataforma para obtenção de biocombustíveis. 2023.

[9] DE AVELAR, Marcilene Calandrine; PONTES, Altem Nascimento; DE PAULA, Manoel Tavares. Educação Ambiental para conservação dos elementos naturais do Parque Natural Municipal de Castanhal (PA). Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 18, n. 1, p. 299-317, 2023.

[10] DEPIANTE, Raryanne Nunes. Estimativa da degradação do óleo lubrificante em motores diesel de locomotivas a partir de parâmetros físico-químicos utilizando redes neurais artificiais. 2023.

[11] FARIAS, Higor Henrique et al. Epoxidação etílica do óleo de pinhão-manso para obtenção de lubrificante biodegradável. 2023.

[12] FOREZI, Luana Silva Magalhães. Aqui tem química! Interciência, 2023.

[13] GAERTNER, Joao Victor Casali. OS DESAFIOS DO TRANSPORTE DE COMBUSTÍVEL NO BRASIL. 2024.

[14] GONÇALVES, Giullia de Paula. Políticas públicas no setor de biocombustíveis no Brasil relacionadas à diminuição de gases de efeito estufa. 2024.

[15] GRECO-DUARTE, J.; Cavalcanti-Oliveira, E.D.; Da Silva, J.A.C.; Fernandez-Lafuente, R.; Freire, D.M.G. Two-Step Enzymatic Production of Environmentally Friendly Biolubricants Using Castor Oil: Enzyme Selection and Product Characterization. Fuel 2017, 202, 196–205.

[16] LEITE, Viviane Gonçalves. Estudo sobre biocombustíveis alternativos para motores de ciclo diesel no Brasil, Argentina e Paraguai. 2023.

[17] MACEDO, Andrew Diego Medeiros et al. Uso do óleo de mamona (Ricinus communis) na obtenção de lubrificantes biodegradáveis. 2023.

[18] MACIEL, Dayanna dos Santos Costa. Design e Sustentabilidade. Editora Intersaberes, 2021.

[19] MAFUANI, Francisco Alberto. PERSPECTIVAS DA TECNOLOGIA DO BIODIESEL E SUA VIABILIDADE PARA INCLUSÃO SOCIAL DE PEQUENOS AGRICULTORES ANGOLA & BRASIL. RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218, v. 4, n. 1, p. e412637-e412637, 2023.

[20] MAUSS, Cristiane Jaqueline. Efeito antioxidante de lignina em compostos elastoméricos para banda de rodagem de pneus. 2020.

[21] MEIRA, Ana Sofia Neves da Silva. Os lubrificantes biodegradáveis e não biodegradáveis - o estado atual de desenvolvimento e estudo comparativo entre os dois tipos de lubrificantes. 2021. Tese de Doutorado.

[22] MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. Contribuições ao estudo das propriedades de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de lignina. 2020.

[23] MONTE, Pollyana Maria Pimentel. Análise de ecoeficiência do óleo extraído da amêndoa de castanha de caju. 2021.

[24] NARAYANA SARMA, Rakesh; VINU, Ravikrishnan. Current status and future prospects of biolubricants: properties and applications. Lubricants, v. 10, n. 4, p. 70, 2022.

[25] PASCOAL, Diego Roberto da Cunha. Impregnação/deposição de bioativos da copaíba (copaifera sp.) em curativos biopoliméricos usando CO2 supercrítico e imersão em diclorometano. 2021.

[26] OLIVEIRA, Milton Cristian de et al. Revisão bibliográfica das principais normas e legislação para o armazenamento e transporte de combustíveis: etanol e derivados de petróleo. 2021.

[27] REEVES, C.J.; Siddaiah, A.; Menezes, P.L. A Review on the Science and Technology of Natural and Synthetic Biolubricants. J. Bio-Tribo-Corros. 2017, 3, 11.

[28] RIOS, Ítalo Castro. Síntese e caracterização de novas moléculas derivadas da mistura de ácidos graxos do óleo da mamona (ricinus communis L.) para aplicação em biolubrificantes. 2021.

[29] SANTIAGO, João Vinicius Pereira. Valorização do lodo primário industrial à partir da extração de óleos e gorduras. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[30] SANTOS, Jamisdean Sales. Avaliação tribológica de óleo vegetal de palma com nanopartículas de cobre e nanotubos de carbono. 2024.

[31] SILVA, Fernando Alves da et al. Desenvolvimento e caracterização de lubrificantes biodegradáveis a partir do óleo de milho. 2024.

[32] SILVA, Liliane Pereira. Caracterização física e química das sementes de andiroba (carapa guianensis) visando a extração do óleo. 2023a.

[33] SILVA, Erickson Fabiano Moura Sousa. Desenvolvimento de lubrificantes verdes: adição de nanopartículas a óleos vegetais e estudo dos desempenhos. 2023b.

[34] VIDAL, Maria de Fátima. Extrativismo: Recursos Florestais Naturais. 2023.

[35] ZUGAIB, Antônio Cesar Costa. A BIOECONOMIA CIRCULAR COMO ESTRATÉGIA PARA AGREGAÇÃO DE VALOR À CACAUICULTURA BRASILEIRA.2023.

[36] PEREIRA, A. et al. Análise tribológica de biolubrificantes à base de óleos vegetais, v. 18, n. 2, p. 89-104, 2023.

[37] SILVA, J. et al. Contribuição dos insumos no custo total do bioprocesso para produção de biolubrificantes em escala de laboratório. Revista de Sustentabilidade, Tecnologia e Humanismo, Campinas, v. 10, n. 1, p. 45-60, 2022.

[38] FERREIRA, L.; ANDRADE, M. Mercado de biolubrificantes poderá crescer até 6% no Brasil até 2024. Portal Lubes, 2023.

[39] MENDES, R. et al. Produção de biodiesel e biolubrificantes: uma abordagem integrada. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

[40] RAMOS, T. et al. Óleos básicos vegetais biodegradáveis como potencial alternativa. Repositório Institucional da UFOP, 2023.

[41] PEREIRA, A. et al. Obtenção de biolubrificante a partir de óleo de palma (Elaeis guineensis). Embrapa Agroenergia, 2023.

[42] SANTOS, R.; OLIVEIRA, M. Avaliação do coeficiente de atrito e desgaste em biolubrificantes: uma abordagem experimental, v. 12, n. 1, p. 45-62, 2024.

Capítulo 10

Análise da expansão e da evolução tecnológica da energia solar no Brasil

Paulo Alves Garcia

Resumo: A energia solar tem se consolidado como uma das principais alternativas sustentáveis para o futuro energético do Brasil, impulsionada por condições naturais favoráveis, avanços tecnológicos e políticas públicas específicas. Este artigo analisa a evolução da energia solar no país, considerando o potencial solar brasileiro, o contexto histórico de desenvolvimento, o arcabouço regulatório, o crescimento da capacidade instalada e os avanços tecnológicos recentes. A pesquisa baseia-se em revisão bibliográfica e documental de fontes oficiais e institucionais. Os resultados indicam que a energia solar passou de uma tecnologia de nicho para um elemento central da matriz elétrica brasileira, contribuindo para a diversificação energética, a redução de emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento socioeconômico. Conclui-se que a energia solar apresenta perspectivas promissoras, embora ainda enfrente desafios regulatórios, financeiros e estruturais.

Palavras-chave: Energia solar, Geração distribuída, Matriz elétrica, Políticas públicas, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

As crescentes demandas por energia elétrica, aliadas às preocupações ambientais e às mudanças climáticas, têm impulsionado a adoção de fontes renováveis em escala global (IEA, 2023). Nesse contexto, a energia solar destaca-se como uma alternativa estratégica, especialmente em países com elevada incidência solar, como o Brasil.

Tradicionalmente dependente da geração hidrelétrica, o sistema elétrico brasileiro passou por um processo de diversificação nas últimas décadas. A energia solar fotovoltaica, inicialmente restrita a aplicações experimentais, ganhou relevância a partir de avanços tecnológicos e da implementação de políticas públicas específicas, com destaque para a regulamentação da geração distribuída em 2012 (ANEEL, 2012).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo analisar a evolução da energia solar no Brasil, enfatizando seus aspectos históricos, regulatórios, tecnológicos e suas perspectivas futuras no contexto da transição energética.

2. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza descritiva e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e documental.

As principais fontes utilizadas incluem a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a International Energy Agency (IEA). O recorte temporal abrange o período entre as décadas de 1970 e 2024, permitindo uma análise histórica e evolutiva da energia solar no Brasil.

3. POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO

O Brasil está localizado em uma região privilegiada do planeta, recebendo uma média de radiação solar entre 4,5 e 6,5 kWh/m^2 por dia. Isso representa um imenso potencial para a geração de energia solar fotovoltaica e térmica (EPE, 2022). Comparado a países europeus, que possuem grande produção mesmo com menor radiação, o Brasil tem condições naturais muito mais favoráveis.

4. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Na segunda metade do século XX, o Brasil começou a explorar as possibilidades da energia solar, principalmente em sistemas isolados e aquecimento solar de água. Entretanto, o alto custo dos equipamentos e a baixa eficiência dos primeiros painéis fotovoltaicos limitavam a sua aplicação comercial. A tecnologia era restrita e o setor ainda não tinha políticas públicas que incentivassem o seu desenvolvimento. A utilização da energia solar no Brasil começou de forma experimental nas décadas de 1970 e 1980, especialmente para aquecimento de água em residências e instituições. As universidades e centros de pesquisa como o Instituto Nacional e Eficiência Energética (INEE) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desempenharam papel fundamental no desenvolvimento das primeiras tecnologias nacionais.

5. POLÍTICAS PÚBLICAS E REGULATÓRIAS E A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A evolução da energia solar no Brasil também está ligada às políticas públicas e regulações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em 2012, a Resolução Normativa nº 482 criou as regras para o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo aos consumidores gerarem a sua própria energia e injetá-la na rede. Essa medida proporcionou o crescimento da geração distribuída. Mais recentemente, o Marco Legal da Geração Distribuída, criado pela Lei 14.300/2022, regulamentou a produção de energia pelos consumidores e a compensação de créditos com a concessionária de distribuição. A lei é de janeiro de 2022 e estabeleceu o regramento da micro e minigeração distribuída de energia. (Portal Solar, 2025). Uma nova regra tarifária, que leva em conta os custos e benefícios do segmento ao setor elétrico, considerando cinco aspectos (transmissão, distribuição, geração, perdas e sinal locacional). A principal mudança com a Lei 14.300/202 foi a introdução da cobrança gradual (de 2023 a 2029), pelo uso da rede (tarifa Fio B) para novos projetos a partir de 7 de janeiro de 2023, visando maior segurança jurídica e equilíbrio sustentável no setor. A Geração Distribuída permitiu aos consumidores, gerar energia própria e reduzir a dependência das concessionárias. Essa modalidade tem promovido a democratização do acesso à energia limpa e incentivado a autonomia energética em áreas remotas, comunidades isoladas e regiões com infraestrutura deficiente (Absolar, 2024), (Portal Solar, 2025).

6. ENERGIA SOLAR EM GRANDES ESCALAS

Além da geração distribuída, o Brasil também tem investido em grandes usinas solares centralizadas, principalmente nos estados do Nordeste e Sudeste. O leilão de energia promovido pelo governo federal tem sido um dos principais mecanismos para a expansão dessas usinas, atraindo investidores nacionais e estrangeiros (Portal Solar, 2025).

7. O CRESCIMENTO DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

Até início da década de 2000, a energia solar fotovoltaica era vista no Brasil como uma tecnologia com aplicações limitadas a áreas remotas ou projetos de demonstração. A partir dos anos 2010, com a queda global nos preços dos módulos solares e avanços na eficiência, o Brasil viu uma crescente adoção da energia fotovoltaica. A partir de 2012, com a publicação da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que regulamentou a geração distribuída e permitiu a compensação de energia, o cenário começou a mudar drasticamente (ANEEL, 2012). Essa regulamentação impulsionou a micro e minigeração. A conscientização sobre os benefícios ambientais e econômicos da energia solar, aliada à queda dos preços dos equipamentos, contribuiu para uma adoção cada vez maior dessa tecnologia. De acordo com a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), a energia solar se tornou a segunda maior fonte da matriz elétrica brasileira em 2023, superando a eólica e ficando atrás apenas da hidrelétrica (ABSOLAR, 2024). Essa posição é um reflexo direto da crescente utilização da energia solar por parte de diversos setores da sociedade (Sampaio, P.G.V.; Gonzalez, M.O.A; Photovoltaic Solar Energy).

8. EXPANSÃO DA CAPACIDADE INSTALADA

O impacto da Resolução Normativa nº 482 e as políticas de incentivo subsequentes são claramente visíveis no aumento exponencial da capacidade instalada de energia solar no Brasil. Em 2017, o país contava com pouco mais de 1 GW de potência instalada (ANEEL, 2018). Em um período de apenas seis anos, esse número saltou para mais de 40 GW em 2024, considerando tanto a geração centralizada (grandes usinas) quanto a geração distribuída (ABSOLAR, 2024).Esse crescimento vertiginoso posicionou o Brasil entre os dez maiores países em capacidade instalada de energia solar no mundo. A maior parte desse crescimento, cerca de 70%, é atribuída à geração distribuída, que democratizou o acesso à energia solar para milhões de brasileiros (ABSOLAR, 2024).

9. AVANÇOS TECNOLÓGICOS EM SISTEMAS E PRODUTOS E SEUS IMPACTOS

Os avanços tecnológicos nos módulos fotovoltaicos, inversores e sistemas de armazenamento ampliaram a eficiência e reduziram custos, viabilizando economicamente a expansão da energia solar (PV Magazine, 2023). Tecnologias como módulos bifaciais e inversores inteligentes, sistemas híbridos e baterias de íon-lítio têm aumentado a confiabilidade e a flexibilidade dos sistemas (EPE, 2022). Paralelamente ao crescimento da utilização e da capacidade instalada, a evolução tecnológica nos sistemas e produtos de energia solar no Brasil tem sido constante, impulsionando a eficiência e a acessibilidade dos equipamentos e componentes dos sistemas. Inicialmente, os sistemas fotovoltaicos eram compostos por módulos policristalinos, inversores string e estruturas de fixação mais robustas. Com o tempo, houve um avanço significativo em diversas frentes:

- Módulos Fotovoltaicos: A transição de módulos policristalinos para monocristalinos e, mais recentemente, para tecnologias como PERC (Passivated Emitter Rear Cell) e Half-Cell (Canal Solar, 2019), resultou em módulos mais eficientes, capazes de gerar mais energia em uma mesma área (PV Magazine, 2023). Além disso, a popularização de módulos bifaciais (Canal Solar, 2019), que captam luz de ambos os lados, tem otimizado a geração em diversas instalações. A tecnologia emergente de Camada Fina (Portal Solar ,2025) é ideal para integração arquitetônica e superfícies não convencionais.
- Inversores: Os inversores, que convertem a corrente contínua dos painéis em corrente alternada utilizável, também passaram por importantes evoluções. A miniaturização, o aumento da eficiência e a incorporação de funcionalidades inteligentes, como o monitoramento remoto e a capacidade de se comunicar com sistemas de gerenciamento de energia, são exemplos dessa evolução. A crescente adoção de microinversores em sistemas de geração distribuída também tem contribuído para maior granularidade, flexibilidade e resiliência dos sistemas. A integração de inversores inteligentes permitiu otimizar o uso da energia gerada, possibilitando monitoramento remoto, controle e interação com redes inteligentes, facilitando a gestão energética (Joeyoung, 2025).
- Sistemas de Armazenamento de Energia: O avanço das tecnologias de armazenamento foi essencial para ampliar a confiabilidade da energia solar. Essa evolução foi importante para aumentar a autonomia e a estabilidade da rede elétrica com os sistemas fotovoltaicos, a partir da implantação dos sistemas

híbridos que permitem o armazenamento do excedente de energia gerada e o seu uso em períodos de baixa irradiação solar ou de alta demanda (EPE, 2022). A transição de baterias convencionais de chumbo-ácido para baterias de íon-lítio melhorou a durabilidade e eficiência dos sistemas. Isso é especialmente relevante para áreas remotas e para sistemas off-grid, além de contribuir para o uso mais eficiente da energia gerada (Siemens, 2025).

- Sistemas de Fixação e Monitoramento: Os sistemas de fixação dos painéis se tornaram mais leves, duráveis e adaptáveis a diferentes tipos de telhados e estruturas. Além disso, o desenvolvimento de plataformas de monitoramento cada vez mais sofisticadas permite aos usuários acompanhar em tempo real a performance de seus sistemas, identificar falhas e otimizar a geração de energia (Neosolar, 2025), (Portal Solar, 2025).
- Sistemas de Rastreamento Solar: O uso de dispositivos que ajustam automaticamente o posicionamento dos painéis em função do movimento solar aumentou a captação de energia, especialmente em grandes usinas (Portal Solar, 2025).

10. PESQUISA, INOVAÇÃO E FUTURO

Instituições de pesquisa brasileiras vêm desenvolvendo estudos avançados, incluindo o uso de materiais inovadores, como as perovskitas, e aplicando nanotecnologia para aumentar a eficiência dos painéis. A parceria entre universidades, governo e iniciativa privada fortalece o setor, que está cada vez mais preparado para se adaptar às demandas de sustentabilidade e eficiência energética (Portal Solar, 2025), (Huawei, 2025).

11. BENEFÍCIOS E DESAFIOS

A energia solar contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação da matriz elétrica e o desenvolvimento socioeconômico (IEA, 2023). Contudo, ainda enfrenta desafios relacionados à burocracia regulatória, financiamento, qualificação profissional e infraestrutura de transmissão.

12. PERSPECTIVAS FUTURAS

As perspectivas são otimistas. Com o avanço das tecnologias, tendência à eletrificação da economia, integração de sistemas com armazenamento e redes inteligentes (smart grids), a energia solar tende a assumir papel ainda mais relevante na matriz energética brasileira. A meta é tornar o país um dos líderes mundiais em energia limpa e acessível (Portal Solar, 2025).

13. CONCLUSÃO

A evolução da energia solar no Brasil é uma história de potencial, inovação, desafios superados e novas possibilidades. Com planejamento, apoio político e investimento em educação e infraestrutura, o país pode aproveitar todo seu potencial solar e construir um futuro sustentável e justo. A evolução tecnológica da energia solar no Brasil

demonstra um cenário promissor, resultado de uma combinação entre inovação, políticas públicas e redução de custos. O país, com sua a enorme incidência solar, tem o potencial de se tornar referência global no setor, contribuindo para uma matriz energética mais limpa, descentralizada e sustentável. A energia solar no Brasil tem trilhado um caminho notável de evolução e expansão, transformando-se de uma tecnologia incipiente em um pilar fundamental da matriz energética nacional. Esse crescimento se manifesta tanto na crescente utilização da fonte fotovoltaica, quanto na capacidade instalada e na constante evolução tecnológica dos sistemas e produtos. Em suma, a energia solar no Brasil representa uma história de sucesso impulsionada por políticas regulatórias favoráveis, o engajamento da sociedade e os avanços tecnológicos. A jornada da energia solar no país é um testemunho de seu potencial para contribuir significativamente com a transição energética e com o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

[1] ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Panorama da energia solar no Brasil**. São Paulo, 2024.

[2] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012.

[3] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Brasília, 2018.

[4] CANAL SOLAR – **Canal de notícias e Informações sobre o setor de Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em https://canalsolar.com.br. São Paulo, 2025.

[5] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia - 2032**. Rio de Janeiro, 2022.

[6] IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023**. Paris, 2023.

[7] INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Energia solar no Brasil: pesquisas e aplicações**. São José dos Campos, 2019.

[8] PV MAGAZINE BRASIL. **Advances in photovoltaic technologies**. 2023.

[9] SAMPAIO, P.G.V.; Gonzalez, M.O.A; **Photovoltaic Solar Energy**. ELSEVIER, 2017.

Capítulo 11

Desenvolvimento de um programa simplificado em Python para o cálculo de estágios em colunas de destilação binária via Método de McCabe-Thiele

Raphaela Barreto Venancio
Sidinei Kleber da Silva

Resumo: Com a crescente demanda por processos industriais otimizados, a engenharia exige a transição das resoluções manuais para soluções computacionais de alta precisão. Nesse sentido, o propósito deste trabalho foi desenvolver um programa simplificado a nível acadêmico, em linguagem Python, que simula o método gráfico de McCabe-Thiele para estimar o número de estágios teóricos em uma coluna de destilação binária. Para a validação da robustez do código, foram realizados dois estudos baseados na separação da mistura Benzeno-Tolueno sob diferentes condições térmicas da alimentação. Para cada caso, a curva de equilíbrio líquido-vapor foi realizada com base na Lei de Raoult e da Equação de Antoine, implementando o método numérico das bissecções para determinar as temperaturas de ebulição precisas. A metodologia baseou-se na automatização do traçamento das retas de operação (retificação e esgotamento) e na reta de alimentação (reta q), possibilitando o cálculo do número de estágios teóricos. Os resultados obtidos foram demonstrados com uma eficiência de 100% e razão de refluxo mínima de 1,421, resultando em 12 e 13 pratos teóricos, com alimentação no 6º e no 7º, respectivamente. A ferramenta desenvolvida revelou alta precisão e flexibilidade, provando-se como uma solução eficaz e eficiente para o dimensionamento e a análise de sensibilidade em operações unitárias de separação.

Palavras-chave: Destilação binária, Método de McCabe-Thiele, Python.

1. INTRODUÇÃO

A destilação é uma operação unitária fundamental para a separação e purificação de misturas, sendo amplamente utilizada em vários setores da indústria, como a petroquímica. Torna-se crucial para obter produtos de alta pureza, essenciais tanto para o consumo direto quanto para processos industriais.

O método de McCabe-Thiele, onde é restrito a misturas binárias, destaca-se por ser uma das ferramentas gráficas mais importantes na Engenharia Química, especificamente para o projeto e análise de colunas de destilação binária. Esse procedimento gráfico permite determinar o número de estágios teóricos (pratos) necessários, de acordo com variáveis como o fluxo de alimentação, frações molares desejadas e a razão de refluxo, utilizando balanços de massa e a curva de equilíbrio líquido-vapor.

O dimensionamento de colunas de destilação exige metodologias de cálculo trabalhosos e extensos, o que torna difícil sua compreensão quando feito manualmente. É necessária uma combinação de fatores gráficos, muita precisão manual e suposições teóricas, podendo levar a erros de precisão, o que justifica a necessidade da modernização.

A ascensão da programação na engenharia torna as habilidades de codificação essenciais para otimizar processos, analisar dados e aumentar a eficiência operacional, permitindo a automação de tarefas repetitivas e simulações complexas agilizando a resolução de problemas na engenharia. A linguagem Python se destaca por sua simplicidade, acessibilidade e ampla biblioteca de ferramentas numéricas vastamente explorada por profissionais e entusiastas.

Ainda que pouco utilizada, a destilação binária é amplamente explorada na graduação no estudo de operações unitárias, graças à sua facilidade. Desse modo, este estudo visa simplificar a compreensão dos princípios que fundamentam essa operação, buscando integrar a teoria de separações com ferramentas computacionais básicas, desenvolvendo uma solução programada que simule o método gráfico de McCabe-Thiele.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver, com o auxílio da linguagem Python, uma ferramenta computacional simples que aplique o método gráfico de McCabe-Thiele para estimar o número de estágios teóricos de uma coluna de destilação binária.

2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Compreender os fundamentos teóricos da separação por destilação e o método de McCabe-Thiele;
- Estudar os conceitos básicos da linguagem de programação Python necessários para a implementação da solução;
- Implementar em Python a construção do gráfico de McCabe-Thiele com base em dados de equilíbrio líquido-vapor;
- Criar uma rotina para calcular o número de estágios a partir do gráfico;

- Validar os resultados obtidos por meio da comparação com exemplos clássicos da literatura.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. DESTILAÇÃO

O processo de separação mais usado na indústria química é a destilação. A separação é baseada no equilíbrio líquido-vapor de misturas. Esse processo é alcançado aquecendo os componentes líquidos misturados a uma temperatura que está entre seus respectivos pontos de ebulição, fervendo assim o líquido de menor temperatura para separá-los por evaporação. (Savree, 2026).

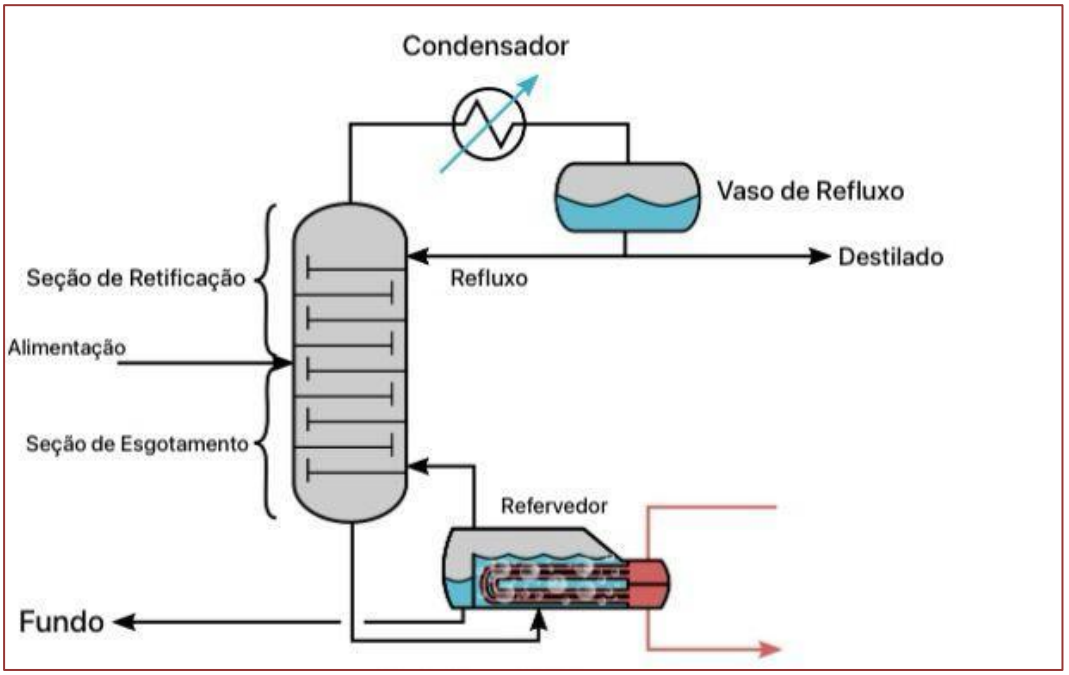
3.2. COLUNAS DE DESTILAÇÃO

A destilação ocorre em colunas, onde seu interior é organizado por pratos ou bandejas. Seu princípio básico de funcionamento envolve a vaporização e condensação sucessiva dos componentes da mistura, promovendo a separação com base nas diferenças nas propriedades voláteis de cada substância.

A coluna de destilação possui quatro componentes principais para facilitar o processo, entre eles:

- Coluna: onde ocorre a separação da fase líquido/gás;
- Refervedor (trocador de calor): aquece e vaporiza o líquido na seção inferior da coluna;
- Condensador: converte o vapor em líquido através da remoção de calor antes de entrar no tambor de refluxo;
- Tambor de refluxo: um vaso de pressão posicionado após o condensador, coletando o líquido condensado.

Figura 1: Componentes Principais da Coluna de Destilação Geral



Fonte: Adaptado de Savree (2026).

Como demonstrado na Figura 1, a mistura a ser destilada na coluna é introduzida no centro da própria, em um prato central conhecido como prato de alimentação (ponto F). Este prato de alimentação central divide a coluna em uma seção superior, denominada de enriquecimento (retificação), onde são concentradas as substâncias mais voláteis, e em uma seção inferior, denominada de esgotamento, onde são concentradas as frações mais pesadas.

No interior da coluna, o refervedor aquecerá essa mistura até atingir sua temperatura de ebulição. Como o vapor é menos denso, ele ascende pelos pratos em direção ao topo, enquanto o líquido desce por gravidade. Assim que atingir a seção superior da coluna, o vapor irá para o condensador e sairá como destilado (ponto D). Já na base, a mistura sairá como resíduo (ponto W).

Dessa forma, a operação consiste na introdução da carga de alimentação, F, seguida do contato de correntes opostas: enquanto o vapor sobe, o líquido desce para a base, e como resultado dessa interação é possível obter o destilado, D, no topo da torre e o resíduo, W, no fundo da coluna. É necessário realizar um balanço de massa global antes de resolver o exercício, sendo de extrema importância para a resolução do mesmo. É realizado da seguinte forma:

$$F = D + W \qquad (1)$$

Onde: F é o fluxo molar de alimentação ($\frac{kmol}{h}$); D é o fluxo molar do destilado (saída do topo) ($\frac{kmol}{h}$); W é o fluxo molar do resíduo (saída da base) ($\frac{kmol}{h}$).

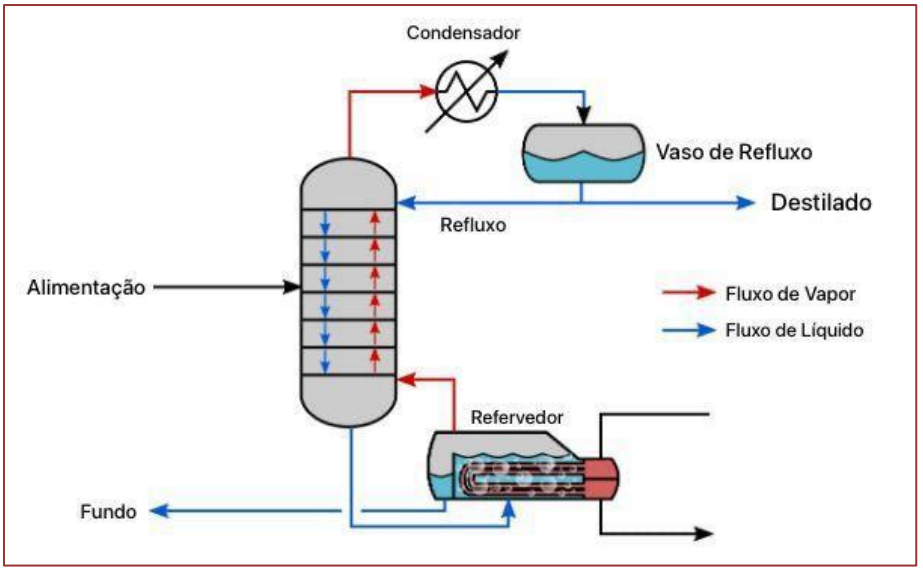
Já o balanço de massa por componente é dada pela Equação 2:

$$F.x_F = D.x_D + W.x_W \qquad (2)$$

Onde: x_F é a fração molar do componente na alimentação; x_D é a fração molar do componente no destilado; x_W é a fração molar do componente no resíduo.

Com o intuito de melhorar a separação das frações desejadas, uma parte do destilado retorna a coluna na forma de refluxo (razão de refluxo), aumentando a concentração de componentes mais voláteis (leves) no topo, garantindo a pureza desejada.

Figura 2: Diagrama de Fluxo do Processo da Coluna de Destilação



Fonte: Adaptado de Savree (2026).

A Figura 2 ilustra esquematicamente os fluxos internos de uma coluna de destilação e sua estrutura. A análise deste diagrama permite a observação da alimentação, e a saída dos produtos de topo e fundo.

3.3. LINHAS DE OPERAÇÃO

As linhas de operação são a representação matemática do que ocorre dentro da coluna de destilação. No método de McCabe-Thiele, são retas que relacionam a composição do vapor que sobe, com a composição do líquido que desce entre dois estágios adjacentes.

A linha de operação de retificação (LOR), demonstrada na Equação 1, representa a parte superior da coluna. É definida pela razão de refluxo, e quanto maior, mais próxima a reta fica da diagonal (y=x), e sempre passa pelo ponto (x_D,x_D), conforme disposto na Equação 3.

$$y = \frac{R}{(R+1)}x + \frac{x_D}{(R+1)} \qquad (3)$$

Onde: y é a fração molar do componente no vapor; R é a Razão de Refluxo; x é a fração molar do componente no líquido; x_D é a fração molar do componente no destilado.

Para encontrar a Razão de Refluxo mínima (R_{min}), o limite teórico onde precisaria de infinitos pratos para realizar a separação, é necessário o ponto de interseção entre a reta q (alimentação) e a Curva de Equilíbrio (xiE, yiE), como demonstrado na Equação 4.

$$R_{min} = \frac{(x_D - yiE)}{(yiE - xiE)} \qquad (4)$$

Onde: x_D é a fração molar do componente no destilado; xiE e yiE são o ponto de interseção entre a reta 'q' e a curva de equilíbrio.

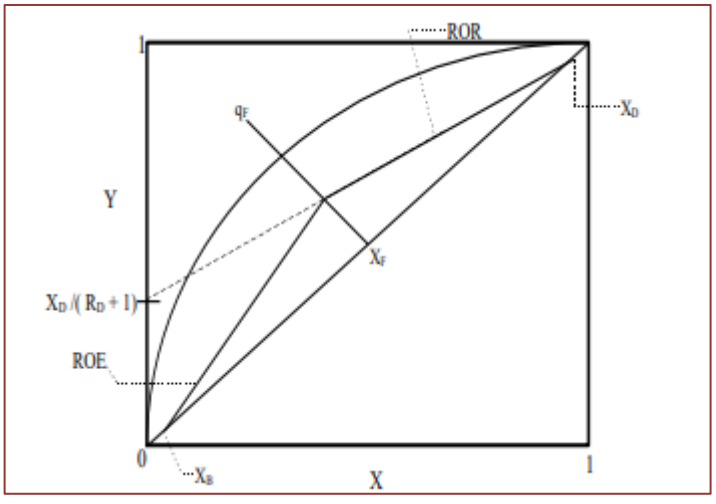
A linha de alimentação (reta q), demonstrada na Equação 3 define onde deve parar de usar a equação de retificação e começar a usar de esgotamento.

$$y = \frac{q}{(q-1)}x - \frac{x_F}{(q-1)} \qquad (5)$$

Onde: y é a fração molar do componente no vapor; q é a condição térmica da carga; x é a fração molar do componente no líquido; x_F é a fração molar do componente na alimentação.

Dessa forma, encontra-se a interseção dessas duas retas, retificação e alimentação, e traça uma reta deste ponto até (x_D,x_D) e outra até (x_W,x_W), chamada de linha de operação da seção de esgotamento. Essa reta representa o balanço de massa na parte inferior da coluna, relacionando as composições do líquido e do vapor para mostrar como o componente mais volátil "esgota" do líquido para produzir o resíduo.

Figura 3: Retas de operação do método de McCabe-Thiele



Fonte: Silva (2019).

A Figura 3 ilustra as linhas de operação sobre o diagrama de equilíbrio líquido-vapor. Estas retas são fundamentais no método de McCabe-Thiele, pois traduzir os balanços de massa em uma estrutura lógica, permitindo a visualização visual para o cálculo dos estágios.

3.4. CURVA DE EQUILÍBRIO

A curva de equilíbrio diz qual a composição máxima de vapor (y) que você consegue obter para uma determinada composição de líquido (x) a uma certa temperatura e pressão. A curva não depende das vazões da coluna, apenas das propriedades da substância.

Esta curva representa a condição onde a composição do líquido é igual à do vapor (x=y). Quanto mais distante a curva estiver da diagonal, mais fácil é a separação. É essencial para visualizar e determinar quantos estágios serão necessários na coluna, relacionando a composição que desce com o vapor que sobe.

A execução da curva é feita pela Equação de Antoine, demonstrada na Equação 6. Sendo a mais usada para a determinação da pressão de vapor do componente de acordo com a temperatura.

$$log\ P = (A) - \frac{(B)}{(C+T)} \qquad (6)$$

Onde: P é a Pressão de vapor (mmHg); A, B, C são as Constantes empíricas; T é a temperatura (ºC).

A Lei de Raoult, base para o cálculo de equilíbrio, diz que a pressão parcial de um componente (P_i) em uma mistura ideal iguala ao produto de sua fração molar na fase líquida (x_i) pela sua pressão de vapor como componente puro na temperatura do sistema:

$$P_i = (x_i . {P_i}^{sat}\ \ (T)) \qquad (7)$$

Considerando a Lei de Dalton para a fase gasosa, a composição da fase vapor em equilíbrio pode ser determinada pela relação:

$$y_i = \frac{(x_i {P_i}^{sat}(T))}{(P_{TOTAL})} \qquad (8)$$

Onde: y_i é a fração molar do componente i na fase vapor; x_i é a fração molar do componente i na fase líquida; ${P_i}^{sat}(T)$ é a pressão de vapor de saturação; P_{TOTAL} é a pressão total do sistema (mmHg).

3.5. METODOLOGIA DE MCCABE-THIELE

Normalmente, a análise dos processos de destilação em sistemas binários se baseia no método gráfico de McCabe-Thiele, permitindo a estimativa do número de estágios necessários para a separação.

O método de McCabe-Thiele é um dos mais simples para a análise de destilação binária. Não requer dados detalhados de entalpia e foi considerado adequado para a maioria dos fins, exceto quando as perdas de calor e calor das soluções são exageradamente grandes.

Neste método pode-se assumir que a coluna opera em regime permanente e em uma pressão constante, permitindo que o líquido e o vapor deixem a coluna em equilíbrio. Dessa forma, sua ferramenta básica é a curva de equilíbrio ("x-y"), que relaciona as frações molares do vapor e do líquido para sistemas binários.

Dessa forma, o método baseia-se no estabelecimento de balanços mássicos às seções de retificação e esgotamento da coluna, ocasionando nas equações que administram o método de McCabe-Thiele, como a linha de operação de retificação e a linha de operação de esgotamento.

3.6. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PRATOS DE UMA COLUNA - EFICIÊNCIA

Para determinar as equações da Linha de Operação de Retificação, Linha de Operação de Esgotamento e Linha de Alimentação, certas informações serão dadas, como: a composição de alimentação (x_F), as composições desejadas (x_D e x_W), a razão de refluxo e a carga de alimentação (q).

Cada linha de operação cruzará com a reta diagonal (y=x) em certos pontos. A Linha de Operação de Retificação cruzará com o ponto (x_D, x_D), a Linha de Operação de Esgotamento com o (x_W, x_W), e a Linha de Alimentação com (x_F, x_F).

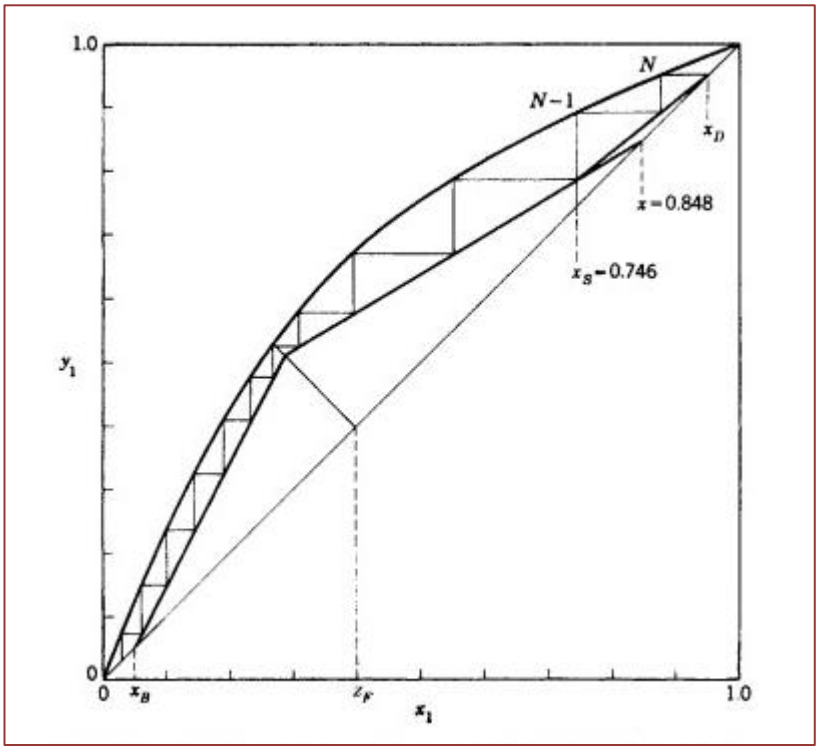
Estas linhas de operação refletem as seções da coluna e a linha de alimentação está relacionada com o prato de alimentação. O prato de alimentação ideal é onde as três linhas principais se cruzam, esse ponto de transição é o que define quando para de se usar a reta de retificação e começa a de esgotamento.

A determinação do número de pratos de uma coluna de destilação pelo método de McCabe-Thiele é um procedimento gráfico combinando os balanços de massa com a termodinâmica de equilíbrio. Para encontrar o número de patos, é construído uma "escada" entre a curva de equilíbrio e as linhas de operação.

Esse processo ocorre da seguinte forma:

1. Inicia-se no ponto (x_D, x_D) sobre a diagonal e traça-se uma linha horizontal até tocar a Curva de Equilíbrio. Esse ponto no eixo y representa a composição do vapor saindo do primeiro prato;
2. Assim, desce-se verticalmente da curva de equilíbrio até tocar a linha de retificação. Esse ponto no eixo x representa a composição do líquido que cai para o próximo prato;
3. Repete-se o processo, e quando o valor de x ultrapassar o ponto de interseção com a reta q, começa a linha de esgotamento;
4. O processo se encerra quando o valor de x for menor ou igual à composição deseja no fundo (x_W).

Figura 4: Determinação do Número de Pratos Ideais pelo Método de McCabe-Thiele



Fonte: Perry (2008).

Na teoria, esses pratos são ideais, como demonstrado na Figura 4, ou seja, que o vapor e o líquido saem perfeitamente em equilíbrio. Mas na realidade isso não acontece e por isso é utilizado a Eficiência de Murphee, que atua em cada degrau. Assim, em vez de o degrau tocar a curva de equilíbrio real, ele toca em uma curva "efetiva" que fica abaixo da original.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste na implementação do software Python (Silva, 2023) na modelagem de uma coluna de destilação utilizando o método gráfico de McCabe-Thiele. Para a validação da precisão desta ferramenta computacional, utilizou-se um estudo de caso de destilação binária (Benzeno-Tolueno) amplamente referenciado na literatura técnica de Operações Unitárias:

1 - Exemplo 18.2 (Adaptado): McCabe; Smith; Harriott, 1993, p. 542. Uma coluna de fracionamento contínuo deve ser projetada para separar 30.000 kg/h de uma mistura de 40% de benzeno e 60% de tolueno em um produto de topo contendo 97% de benzeno e um produto de fundo contendo 98% de tolueno. Estas porcentagens são em peso. Uma razão de refluxo de 3,5 mol por 1 mol de produto deve ser utilizada. Os calores latentes molares do benzeno e do tolueno são 7.360 e 7.960 cal/gmol, cerca de 2,5. A alimentação tem um ponto de ebulição de 95ºC a uma pressão de 1 atm.

a) Calcule os mols de produto de topo e produto de fundo por hora.

b) Determine o número de pratos ideais e a posição do prato de alimentação (q=1,37).

c) Determine o número de pratos ideais e a posição do prato de alimentação (q=0,333).

Com auxílio do gráfico a ser desenvolvido, será possível encontrar as vazões de topo e fundo, números de pratos teóricos, composições de equilíbrio e a posição do prato de alimentação (ponto de carga ótimo).

4.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Os exercícios oferecem certos dados para desenvolver o exercício, como a vazão de alimentação e as composições molares desejadas para o topo (x_D), e para o fundo (x_W). No exercício para a validação do estudo utilizou-se uma mistura de Benzeno-Tolueno com $x_F = 0{,}44$.

Fornecem, também, a razão de refluxo (R), que controla a inclinação da reta de retificação, e a condição térmica da carga (q). E em alguns casos a eficiência de Murphee (N_M) é fornecida, e é aplicada em cada cálculo de estágios para ajustar a composição do vapor real em relação ao teórico.

Os dados termodinâmicos não são fornecidos pelo exercício, mas as Constantes de Antoine (A, B, C) podem ser encontradas na literatura. Estes dados permitem o cálculo das pressões de saturação (P^{sat}) e a construção da curva de equilíbrio. Pode-se assumir que a pressão é de 1 atm, que equivale a 760 mmHg.

Figura 5: Parâmetros de entrada

```
# Dados oferecidos

Xf = 0.44
Xd = 0.974
Xw = 0.0235
q = 0.33
R = 3.5          #Reflux ratio
Ntray = 1      #Tray efficiency

# Dados para a Equacao de Antoine

A1, B1, C1 = 6.89272, 1203.531, 219.888    # Benzeno
A2, B2, C2 = 6.95464, 1344.800, 219.480    # Tolueno
P_Total = 760  #(mmHg)
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A Figura 5 mostra os valores de entrada que o código necessita para o seu funcionamento, sendo necessário apenas trocá-los quando resolver exercícios diferentes.

Figura 6: Plotagem das frações molares

```
151    p.plot([Xf],[Xf],'o',color='m',label="Xf")
152    p.plot([Xd],[Xd],'o',color='k',label="Xd")
153    p.plot([Xw],[Xw],'o',color='c',label="Xw")
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A plotagem dos pontos das composições (x_D, x_F, x_W) é simples, como demonstrado na Figura 6. Basta considerar o ponto onde 'x' e 'y' possuem esse mesmo valor, e depois nomeá-los com seus respectivos nomes.

4.2. MODELAGEM DA CURVA DE EQUILÍBRIO

Para a representação gráfica, a função $np.linspace(início, fim, quantidade)$ da biblioteca NumPy cria um vetor igualmente espaçado. O domínio das frações molares líquidas (x) foi definido em um intervalo [0, 1, 100] correspondendo a toda a faixa de concentração possível da mistura binária. Para cada um desses pontos, o código calcula a temperatura de ebulição e a fração de vapor (y) em equilíbrio, obtendo o comportamento termodinâmico da mistura.

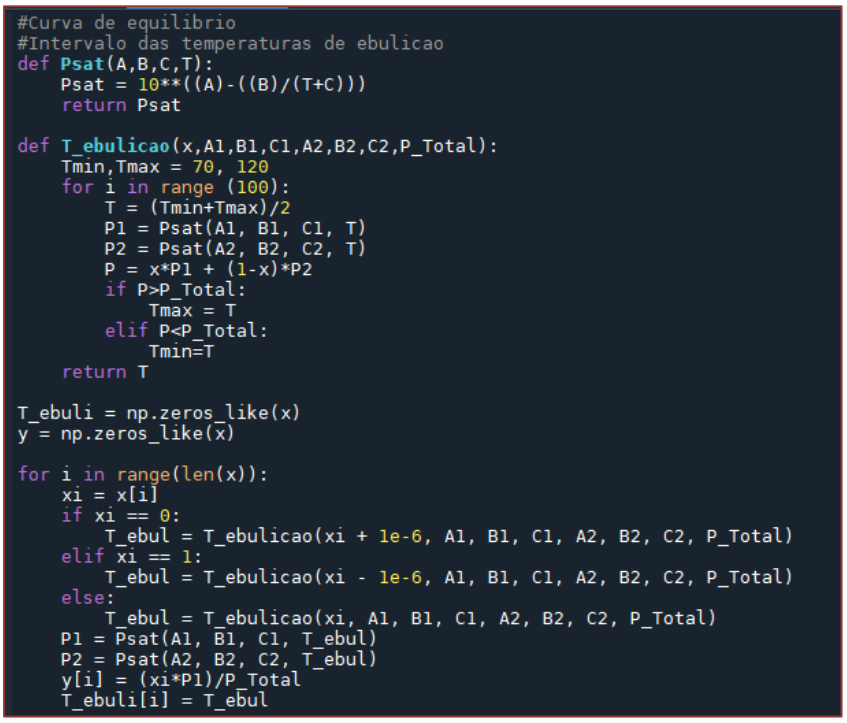
Primeiramente, definimos uma função que encontre a pressão saturada (Psat) pela Equação de Antoine, assim não é preciso repetir o mesmo cálculo, o código muda as variáveis assim que calcular o último valor.

Depois, é definida uma outra função, a que encontra T, já que não é possível isolar o R na equação $P = x_1 {P_1}^{sat}(T) + x_2 {P_2}^{sat}(T)$. Primeiro determinamos o intervalo de temperatura que ele deve procurar, sendo a temperatura de ebulição de cada componente (com uma margem de diferença para não ter erro), esse processo ocorrerá 100 vezes.

O código testa a temperatura média e usa a função da pressão de vapor com esse valor encontrado, assim substitui na equação da pressão. Se a pressão calculada for maior que a pressão total do sistema (760 mmHg), o sistema ferve muito cedo ($T_{max} = T$), então baixamos, se for menor, o sistema não ferveu ainda ($T_{min} = T$). Após as 100 repetições, ele encontra a temperatura de bolha ideal da mistura.

Assim, assume-se que "T_ebuli" e "y" têm o mesmo tamanho de "x", para que no laço de repetição "for", ele percorra cada ponto do vetor x e chame a função de bisseção (T_ebul). Com a temperatura correta, é aplicado a Lei de Raoult ($y_i = \frac{(x_i {P_i}^{sat})}{P_{total}}$) para encontrar a composição de vapor em equilíbrio (y). Dessa forma, é construída a curva de equilíbrio, que será plotada no gráfico, com a reta diagonal (y=x), na terceira linha do código a seguir:

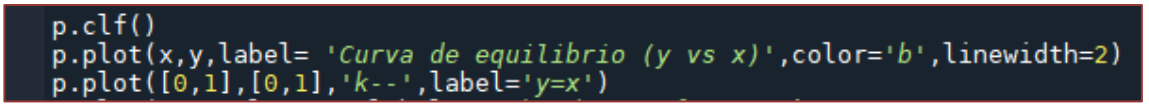
Figura 7: Algoritmo para cálculo do equilíbrio líquido-vapor



```
#Curva de equilibrio
#Intervalo das temperaturas de ebulicao
def Psat(A,B,C,T):
    Psat = 10**((A)-((B)/(T+C)))
    return Psat

def T_ebulicao(x,A1,B1,C1,A2,B2,C2,P_Total):
    Tmin,Tmax = 70, 120
    for i in range (100):
        T = (Tmin+Tmax)/2
        P1 = Psat(A1, B1, C1, T)
        P2 = Psat(A2, B2, C2, T)
        P = x*P1 + (1-x)*P2
        if P>P_Total:
            Tmax = T
        elif P<P_Total:
            Tmin=T
    return T

T_ebuli = np.zeros_like(x)
y = np.zeros_like(x)

for i in range(len(x)):
    xi = x[i]
    if xi == 0:
        T_ebul = T_ebulicao(xi + 1e-6, A1, B1, C1, A2, B2, C2, P_Total)
    elif xi == 1:
        T_ebul = T_ebulicao(xi - 1e-6, A1, B1, C1, A2, B2, C2, P_Total)
    else:
        T_ebul = T_ebulicao(xi, A1, B1, C1, A2, B2, C2, P_Total)
    P1 = Psat(A1, B1, C1, T_ebul)
    P2 = Psat(A2, B2, C2, T_ebul)
    y[i] = (xi*P1)/P_Total
    T_ebuli[i] = T_ebul
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 8: Plotagem da curva de equilíbrio e da diagonal



```
p.clf()
p.plot(x,y,label= 'Curva de equilibrio (y vs x)',color='b',linewidth=2)
p.plot([0,1],[0,1],'k--',label='y=x')
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Com as Figuras 7 e 8, foi possível visualizar o código para a construção e plotagem da curva de equilíbrio.

4.3. CÁLCULO DAS RETAS DE OPERAÇÃO

Para calcular a linha de retificação, foi utilizado a variável ‘t’, e para a de alimentação ‘w’. É importante ressaltar que quando a carga é um líquido saturado (q=1) a inclinação da reta de alimentação seria infinita (divisão por zero), então será tratada como uma exceção caso apareçam exercícios desse caso. Esse processo é demonstrado na Figura 9:

Figura 9: Cálculo da reta de retificação e alimentação

```
#Linha de retificacao
t= ((R/(R+1))*x + (Xd/(R+1)))

#Linha de alimentacao
if q == 1:
    p.axvline(x=Xf, color='r', label='Linha de alimentacao (Líq. Sat.)')
    w = np.full_like(x, np.nan)
else:
    w = ((q/(q-1))*x - (Xf/(q-1)))
    p.plot(x, w, color='r', label='Linha de alimentacao')
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Foi criado um outro código, que se integra no principal, para encontrar o ponto de interseção das retas de retificação e alimentação (Xint,Yint). Neste código, se trata da exceção da linha q, e é realizado uma regressão linear para as duas retas, encontrando, assim, o ponto de interseção. Esse código é ilustrado nas Figuras 10 e 11.

Figura 10: Função para cálculo do ponto de interseção

```
import numpy as np

def inter(Xf, Xd, Xw, q, R, Ntray):


    # Xf = 0.44
    # Xd = 0.974
    # Xw = 0.0235
    # q = 0.33
    # R = 3.5          #Reflux ratio
    # Ntray = 1      #Tray efficiency
    x=np.linspace(0,1,100)

    #Linha de retificacao
    t= ((R/(R+1))*x + (Xd/(R+1)))

    if q == 1:
        # Se q=1, a interseção ocorre exatamente em Xf
        x_int = Xf
        # Substituímos o Xf na reta de retificação para achar o y_int
        y_int = (R/(R+1))*Xf + (Xd/(R+1))
        return [float(x_int), float(y_int)]
    else:

        #Linha de alimentacao
        w= ((q/(q-1))*x - (Xf/(q-1)))
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 11: Regressão linear e interseção das retas

```
from scipy import stats
from sympy import Symbol, solve


# função para t (regressão linear)
coef_ang, coef_lin, r_value, p_value, std_err = stats.linregress(x, t)

# função para w (regressão linear)
coef_ang2, coef_lin2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(x, w)

# resolvendo o sistema
x = Symbol('x')
y = Symbol('y')
eqw = coef_ang*x + coef_lin -y
eqt = coef_ang2*x + coef_lin2 -y

# imprimindo o resultado
pos = solve([eqw,eqt])
#print(f'para x={pos[x]: .3f}, y={pos[y]: .3f}')
return ([pos[x],pos[y]])
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Quando é encontrado o ponto da interseção, chama-se no código principal essa função e atribui um nome para esses valores (x_int, y_int), como mostrado na Figura 12.

Figura 12: Chamada do ponto de interseção no código principal

```
[x_int,y_int] = inter(Xf, Xd, Xw, q, R, Ntray)
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Com esses valores já definidos, é possível definir a Reta de Esgotamento por um vetor denominado de [x_reta, y_reta], sendo o início e o fim da reta. Isso ocorre quando se conecta o ponto de fundo (x_W) até o da interseção.

Da mesma forma, pode-se definir a reta de retificação dentro da coluna (já está definida, mas deve-se destacar esta reta dentro do gráfico) pelo vetor [x_reta1, y_reta1], conectando o ponto de interseção até o ponto de topo (x_D).

Figura 13: Vetores para o traçado das retas de operação

```
x_reta=[Xw,x_int]
y_reta=[Xw,y_int]

x_reta1=[x_int,Xd]
y_reta1=[y_int,Xd]
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figuras 14 e 15: Plotagem das linhas de operacionais e do ponto de interseção

```
p.plot(x_int,y_int,'o',color='purple',label='intersecao')
p.plot(x_reta,y_reta,color='b')
p.plot(x_reta1,y_reta1,color='b')

p.plot(x,t,color='g',label='Linha de retificacao')
p.plot(x,w,color='r',label='Linha de alimentacao')
p.plot([x_int, Xw], [y_int, Xw], 'k--', label='Reta Esgotamento Real')
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

As Figuras 13, 14 e 15 ilustram o traçamento das retas de operação e suas plotagens no gráfico.

Para a determinação da razão de refluxo mínima (Rmin), é preciso ter o ponto de interseção crítico entre a reta de alimentação (q) e a curva de equilíbrio. Assim, utilizou-se a função de interpolação linear para encontrar a composição de vapor (y_p) em equilíbrio com a fase líquida no prato de alimentação (ponto de entrada da carga) (x_p). Dessa forma, aplicou esses valores na Equação 4, e foi feito a razão de $\frac{R}{R_{min}}$, mostrado na Figura 16 a seguir:

Figura 16: Cálculo da Razão de Refluxo Mínima

```
def calcular_Rmin(xd, xf, q, x_equi, y_equi):
    # 1. Encontrar o ponto onde a reta q toca a curva de equilíbrio
    if q == 1:
        x_p = xf
    else:
        x_p = xf

    # Encontra o y de equilíbrio correspondente ao x_p
    y_p = np.interp(x_p, x_equi, y_equi)

    # 2. Calcular Rmin pela fórmula
    rmin = (xd - y_p) / (y_p - x_p)
    return rmin

R_min = calcular_Rmin(Xd, Xf, q, x, y)
print(f"Razão de Refluxo Mínimo: {R_min:.3f}")
print(f"Razão de Operação (R/Rmin): {R/R_min:.2f}")
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

4.4. DETERMINAÇÃO DOS PRATOS TEÓRICOS

Para a determinação dos estágios teóricos, utilizou-se a interpolação linear *np.interp*, para encontrar o valor de 'x' correspondente ao valor de 'y', sendo a parte mais importante para "fechar" o degrau. Tudo começa no topo da coluna, onde o componente é mais puro. No loop 'while' é onde se desenha os pratos, simulando o caminho que o líquido e o vapor fazem dentro da torre, do topo ao fundo. Quando está em um ponto da reta de operação, precisa ir até a curva de equilíbrio, então o código descobre qual o x ideal.

Aqui se aplica a Eficiência de Murphee, pois o prato não é perfeito, então o degrau não vai até a curva de equilíbrio. Como a eficiência do exercício de estudo é 0,4, isso significa que o degrau só percorre 40% da distância até a curva. Assim que encontrar o x ideal, é preciso descer verticalmente até encostar na linha de operação novamente para começar o próximo prato. É feito um teste para verificar onde o 'x' está para saber se ainda usa a reta de retificação (parte de cima da coluna), ou se já passou do prato de alimentação e pode usar a reta de esgotamento (parte de baixo da coluna).

As listas x_steps e y_steps guardam as informações das coordenadas de cada degrau, para assim ser feito a plotagem dos pratos teóricos.

Figuras 17 e 18: Algoritmo que determina os pratos teóricos

```
while x_atual > Xw:
    num_pratos += 1 # Incrementa a cada novo degrau

    # 1. Movimento horizontal (Eficiência de Murphree)
    x_eq = np.interp(y_atual, y, x)
    x_real = x_atual - eta * (x_atual - x_eq)

    x_steps.extend([x_atual, x_real])
    y_steps.extend([y_atual, y_atual])

    x_atual = x_real

    if x_atual <= Xw:
        break

    # 2. Movimento vertical até a linha de operação
    if x_atual > x_int:
        y_proximo = (R/(R+1))*x_atual + (Xd/(R+1))
    else:
        if prato_alim==0:
            prato_alim=num_pratos
        m_esg = (y_int - Xw) / (x_int - Xw)
        y_proximo = m_esg * (x_atual - Xw) + Xw

    x_steps.append(x_atual)
    y_steps.append(y_proximo)
    y_atual = y_proximo

print(f"Total de pratos reais: {num_pratos}")
print(f"A alimentação deve ser feita no prato: {prato_alim}")
```

```
# Função para encontrar x dado um y na curva de equilíbrio
def get_x_eq(y_val, x_array, y_array):
    return np.interp(y_val, y_array, x_array)

#Construção dos Pratos
x_steps = [Xd]
y_steps = [Xd]

x_atual = Xd
y_atual = Xd
eta = Ntray
num_pratos = 0  # Inicializa o contador
prato_alim=0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 19: Plotagem final dos estágios teóricos

```
p.plot(x_steps, y_steps, color='orange', label=f'Pratos Reais (η={eta})')
p.title(f'Diagrama de McCabe-Thiele: {num_pratos} Pratos Reais (η={eta})')
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Pelas Figuras 17, 18 e 19 pode-se entender como é calculado os pratos teóricos, levando em consideração todos os pontos importantes para esse processo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No exercício foi possível obter essas informações para as alternativas a) e b):

a) foram feitos os balanços de massa, e os seguintes valores foram declarados:

$$x_F = 0{,}44;\ x_D = 0{,}974;\ x_W = 0{,}0235$$

$$F = 350\frac{Kg\ mol}{h};\ D = 153{,}4\frac{Kg\ mol}{h};\ W = 196{,}6\frac{Kg\ mol}{h}$$

b) foram encontrados os seguintes valores:

Figura 20: Dados obtidos para o exercício 1.b

```
Total de pratos reais: 12
A alimentação deve ser feita no prato: 6
Razão de Refluxo Mínimo: 1.421
Razão de Operação (R/Rmin): 2.46
```

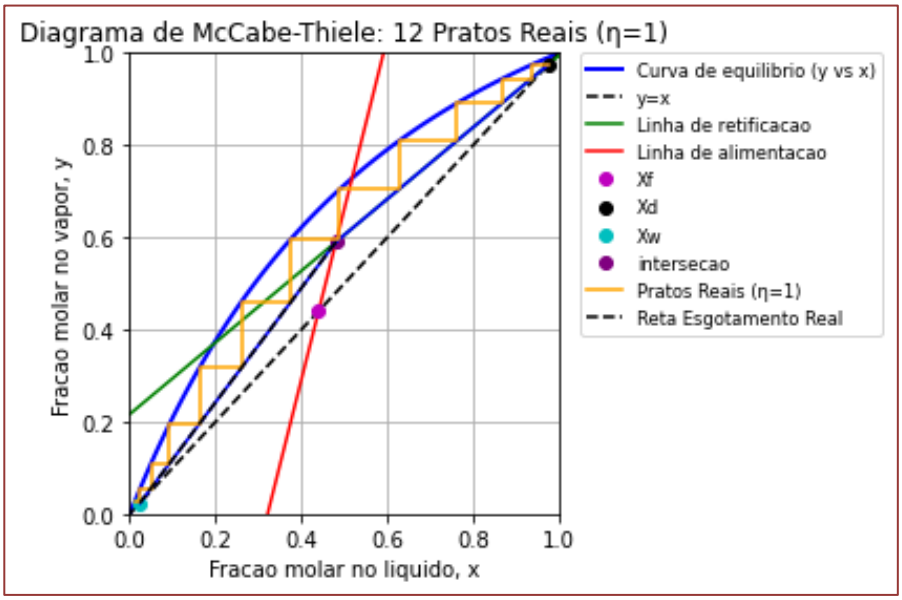
Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Nesse caso, pode-se perceber, pela Figura 20, que o prato de alimentação é o 6º, onde a mistura entra na coluna. O ponto roxo no gráfico (interseção) é quem separa as seções.

Um fator necessário para a compreensão do gráfico é a Razão de Refluxo Mínimo (R_{min}), dada com o valor de 1,421. Este valor representa o limite termodinâmico em que a força motriz de separação se anula no ponto de interseção das linhas de operação com a curva de equilíbrio. O exercício deu um refluxo de 3,5, o que resulta na razão $\frac{R}{R_{min}} = 2{,}46$, o que justifica o número de estágios teóricos necessários serem reduzidos, mas implica um maior consumo energético no refervedor para manter a carga térmica da coluna.

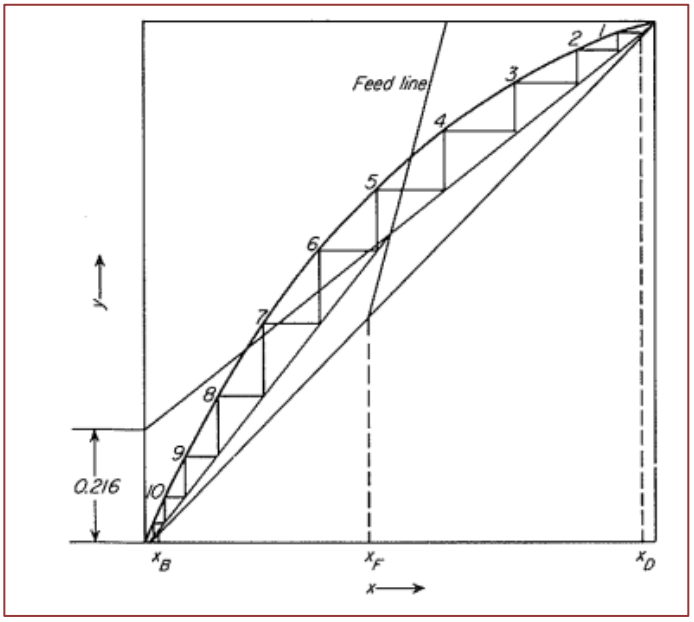
Para responder a letra b) da questão 1, foi plotado o gráfico no Python e comparado com o gráfico resolvido no livro, demonstrado pelas Figuras 21 e 22. Vale ressaltar, que o programa desenvolvido no Python é muito preciso, então enquanto o último degrau não tocar no x_W, ele continua contando. A resolução do exercício no livro diz que para a condição da carga (q=1,37), o valor total de pratos ideais é 10.

Figura 21: Gráfico obtido para o exercício 1.b



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 22: Gráfico dado pela resolução para o exercício 1.b



Fonte: McCabe; Smith; Harriott (1993).

Com esses dois gráficos (Figuras 21 e 22), é possível comparar se o gráfico obtido pelo Python está de acordo com a resolução do exercício. E pela Figura 22 pode-se perceber que o número de estágios seria 12, mas como o loop 'while', no código, é muito restrito,

pode ser que seja entre 11 e 12. Se contar 11 pratos, deve lembrar que no código do Python, leva em consideração o refervedor (10 pratos + refervedor), já na resolução não.

E o prato de alimentação coincide com os dados do gráfico da resolução, sendo o 6º prato, depois da linha de alimentação, onde começa a reta de esgotamento.

c) (teste 2) foi possível obter essas informações:

Figura 23: Dados obtidos para o exercício 2.c

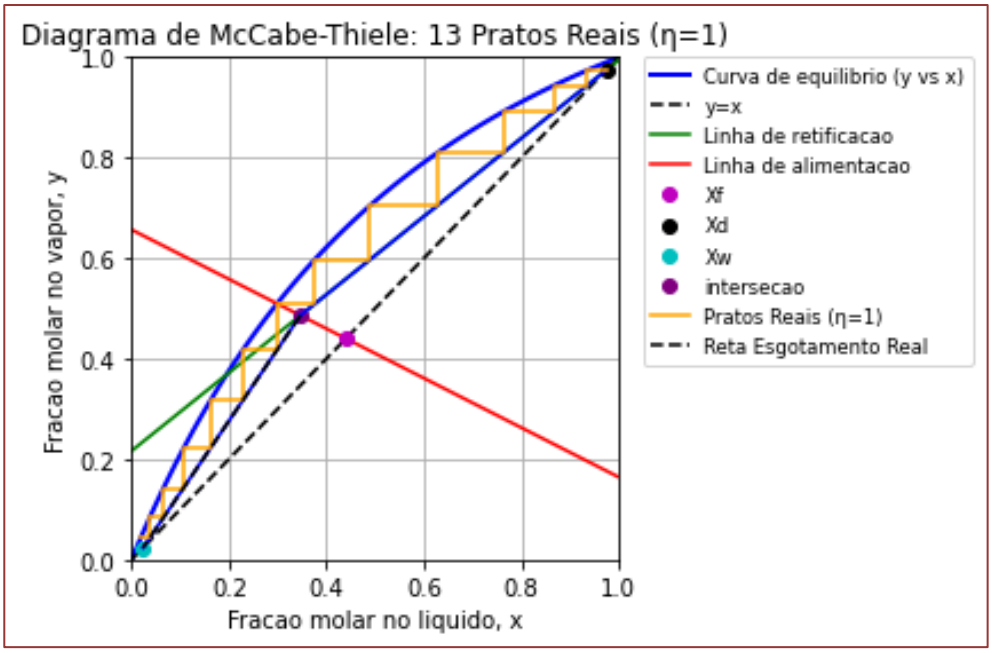
```
Total de pratos reais: 13
A alimentação deve ser feita no prato: 7
Razão de Refluxo Mínimo: 1.421
Razão de Operação (R/Rmin): 2.46
```

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Na Figura 23, pode-se perceber que o prato de alimentação é o 7º, onde a mistura entra na coluna. O ponto roxo no gráfico (interseção) é quem separa as seções. A razão de refluxo mínima é a mesma (1,421) e sua razão também (2,46).

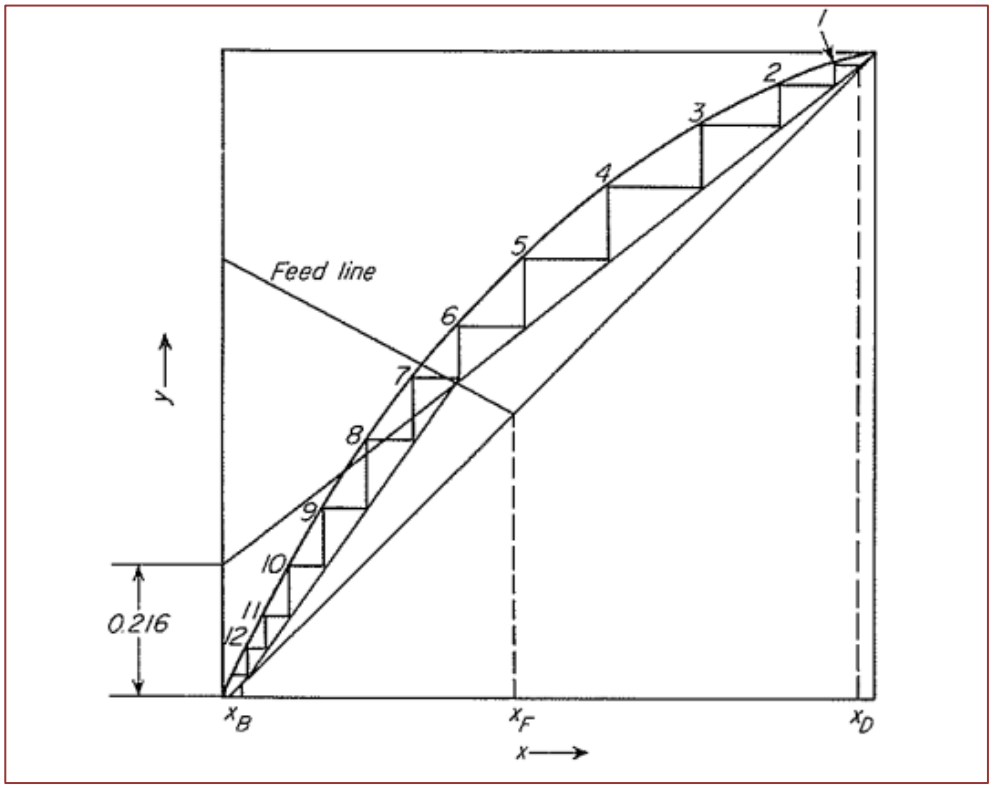
Para responder a letra c) da questão 1, foi plotado o gráfico no Python e comparado com o gráfico resolvido no livro, demonstrado pelas Figuras 24 e 25. Vale ressaltar, que o programa desenvolvido no Python é muito preciso, então enquanto o último degrau não tocar no x_W, ele continua contando. E a resolução do exercício no livro diz que para a condição da carga (q=0,333), o valor total de pratos ideais é 12.

Figura 24: Gráfico obtido para o exercício 1.c



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 25: Gráfico dado pela resolução para o exercício 1.c



Fonte: McCabe; Smith; Harriott (1993).

Com esses dois gráficos, é possível comparar se o gráfico obtido pelo Python está de acordo com a resolução do exercício. E pela Figura 25 pode-se perceber que o número de estágios seria 13, mas como o loop 'while', no código, é muito restrito, ele conta o refervedor parcial, então seria 12 pratos sem ele.

E o prato de alimentação coincide com os dados do gráfico da resolução, sendo o 7º prato, depois da linha de alimentação, onde começa a reta de esgotamento. É importante ressaltar que nesses exemplos os pratos são teóricos, pois sua eficiência é de 100%, podendo verificar a diferença do exercício 1 para esse, já que os degraus tocam na curva de equilíbrio, resultando em um menor número de pratos.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do estudo permitiu o aperfeiçoamento dos conhecimentos em processos químicos e habilidades em programação. Por meio da ferramenta desenvolvida no Python, que simula o método gráfico de McCabe-Thiele, foi possível substituir o método gráfico manual por uma solução computacional, reduzindo margens de erro de precisão, garantindo resultados confiáveis para o sistema Benzeno-Tolueno.

A execução dos cálculos mostrou que a coluna de destilação opera de forma concisa sob uma razão de refluxo de 3,5, sendo consideravelmente superior que a razão mínima calculada pelo código (1,421), garantindo a separação desejada de seus pratos reais, por

conta da eficiência aplicada na coluna. Foi identificado o prato de alimentação, onde a carga entra, reforçando a eficiência termodinâmica necessária para a separação desejada.

Desta forma, a eficácia desta ferramenta se consolidou no exercício, comprovando a exatidão dos cálculos da razão de refluxo, construção dos degraus e a localização do prato de alimentação, quando comparado com o resultado dado pela literatura.

Conclui-se que o uso da linguagem Python facilita a resolução dos problemas propostos e proporciona uma compreensão mais clara da coluna de destilação. Logo, demonstrou-se um código robusto que tem a capacidade de se adaptar a diferentes problemas. Sendo assim, valida-se a necessidade de ferramentas computacionais na resolução de problemas na engenharia, permitindo uma maior precisão técnica.

REFERÊNCIAS

[1] MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993. Disponível em: https://evsujpiche.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/06/unit-operations-of-chemical-engineering-5th-ed-mccabe-and-smith.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

[2] SAVREE. **Coluna de Destilação Explicada**. [S. l.], [202-?]. Disponível em: https://savree.com/pt/enciclopedia/coluna-de-destilacao. Acesso em: 1 mar. 2026.

[3] SILVA, Lucas Henrique da. **Método McCabe-Thiele: determinação da razão de refluxo e do número de estágios teóricos em colunas de destilação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2019. Disponível em: https://scispace.com/pdf/metodo-mccabe-thiele-determinacao-da-razao-de-refluxo-no-36u2gylikx.pdf. Acesso em: 20 mar. 2026.

[4] SILVA, Sidinei, **Introdução ao Python para Engenharia Química"**, Editora Blucher, 2023.

Capítulo 12

Using mathematical and statistical tools for problem solving (Case Studies)

Hugo Pimentel Tavares
Ariane Menezes Ayres
Luiz Filippe Cardoso Botelho
Carlos Augusto da Silva Marins
Ariane Ferreira Gonçalves
Michelle França Rabelo Cunha
Diogenes da Silva Oliveira
Adriana Brasil Vargas
Flavia Tostes Fontes de Andrade
Nilo Antonio de Souza Sampaio

Abstract: Mathematics and Statistics have numerous applications in people's daily lives, addressing problems we encounter every day and helping to solve complex issues that require large amounts of data or more robust solutions. This chapter of the book will address two case studies, one quite simple and the other more complex, where solutions are found using mathematical models and statistical tools; through a scientific approach, an optimized solution will be reached.

Keywords: Mathematics and Statistics, mathematical models, statistical tools, scientific approach.

1. INTRODUCTION

During the last century, statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better research parameters, making it possible toguide decision making in a wide variety of areas. Statistical methods were developed as a mixture of science and logic for the solution and investigation of problems in various areas of human knowledge (Abraão et al., 2025; Antônio et al., 2025).

Launching a new product and/or process usually involves working with a large number of variables. Proper planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable for obtaining reliable results and carrying out consistent statistical analyses. In this context, it is no longer possible to develop products and processes empirically, as was done in the past. Fierce competition, the spread of technological processes and the responsibility of the scientific community now make such procedures impossible. Optimizing processes requires more than ever a robust and efficient statistical study (Deus et al., 2024; Espuny et al., 2023; Reis et al., 2022).

Mathematical modelling plays a crucial role in the field of process optimisation. In fact, the effectiveness of process optimisation is intrinsically linked to the quality of the models obtained. In other words, a process of optimisation can only achieve satisfactory results if the mathematical model representing it is of high quality. Mathematical modelling finds utility in a wide spectrum, encompassing biology, medicine, chemistry, and the social sciences. The significance of mathematical models becomes evident in diverse applications, such as water resource management (Gomes et al., 2019).

The purpose of this chapter is to present the results obtained through the use of experimental design in two case studies, illustrating the practical applications of this knowledge

2. THEORETICAL FRAMEWORK

Conventional statistical tests are usually called parametric tests. Parametric tests are used more frequently than nonparametric tests in many medical articles, because most of the medical researchers are familiar with and the statistical software packages strongly support parametric tests. Parametric tests require important assumption; assumption of normality which means that distribution of sample means is normally distributed. However, parametric test can be misleading when this assumption is not satisfied. In this circumstance, nonparametric tests are the alternative methods available, because they do not required the normality assumption. Nonparametric tests are the statistical methods based on signs and rank (Nahm, 2016).

3. METHODOLOGICAL PRODEDURES

In this study, the research is methodologically classified as experimental, applied, and quantitative, as it involves data collection, data processing, and subsequent analysis and interpretation of the results. In terms of objectives, this type of study can be classified as descriptive, exploratory, and explanatory (Bertrand & Fransoo, 2002).

A case study was conducted using an experimental design. Both issues were resolved, and the solution to the problem was discussed.

4. MATERIALS AND METHODS

The paper presents a case study carried out in a Chemical Industry in the Sul Fluminense region, in the state of Rio de Janeiro. Factors A (Temperature in ºC), B (Concentration mg/L) and C (Type A and B Catalyst) are shown in Table 1, where each factor has three Levels.

Table 1 - Three Factors used in this study, each with 2 Levels

Temp	Conc	Cat	Yield
160	20	A	59
180	20	A	74
160	40	A	50
180	40	A	69
160	20	B	50
180	20	B	81
160	40	B	46
180	40	B	79
160	20	A	61
180	20	A	70
160	40	A	58
180	40	A	67
160	20	B	54
180	20	B	85
160	40	B	44
180	40	B	81

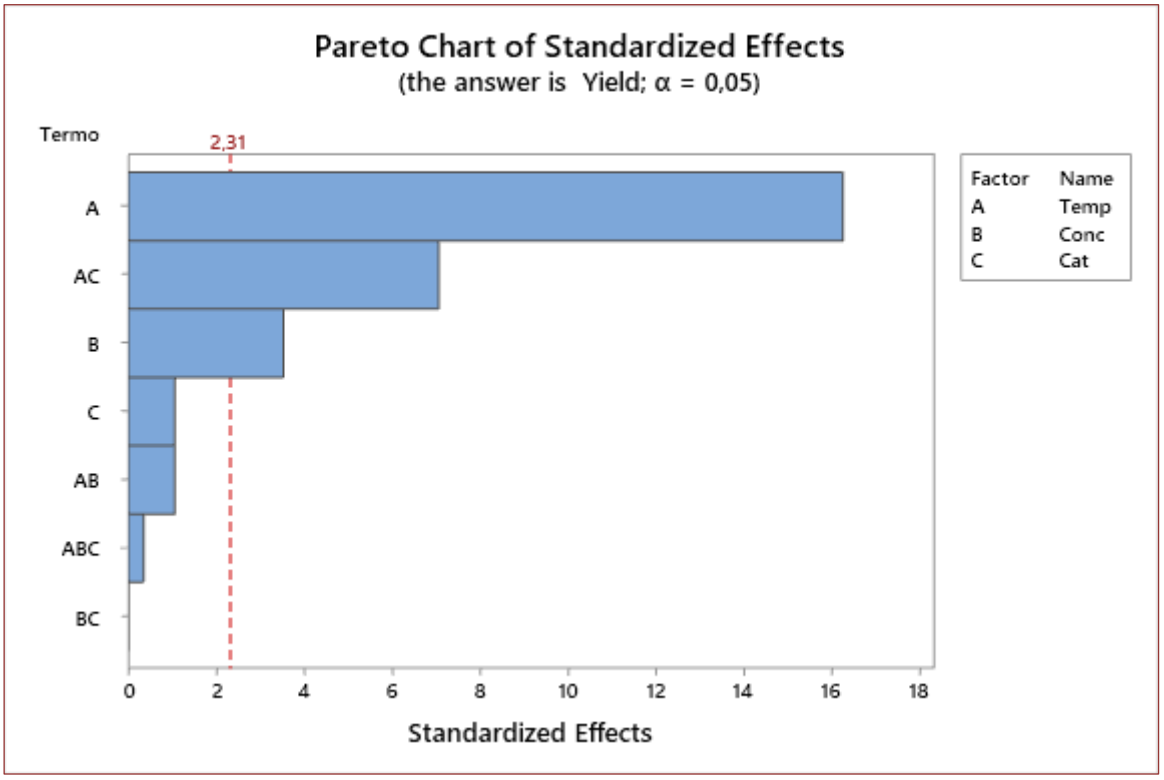
Source: Authors (2026).

As each factor and each level leads to an output of finished product in tons. A Full Factorial Experiment was carried out to understand which factor and at which level leads to a higher yield. In this study, as the Response Variable is Income, the Higher the Response Variable, the Better the result.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Case 1:

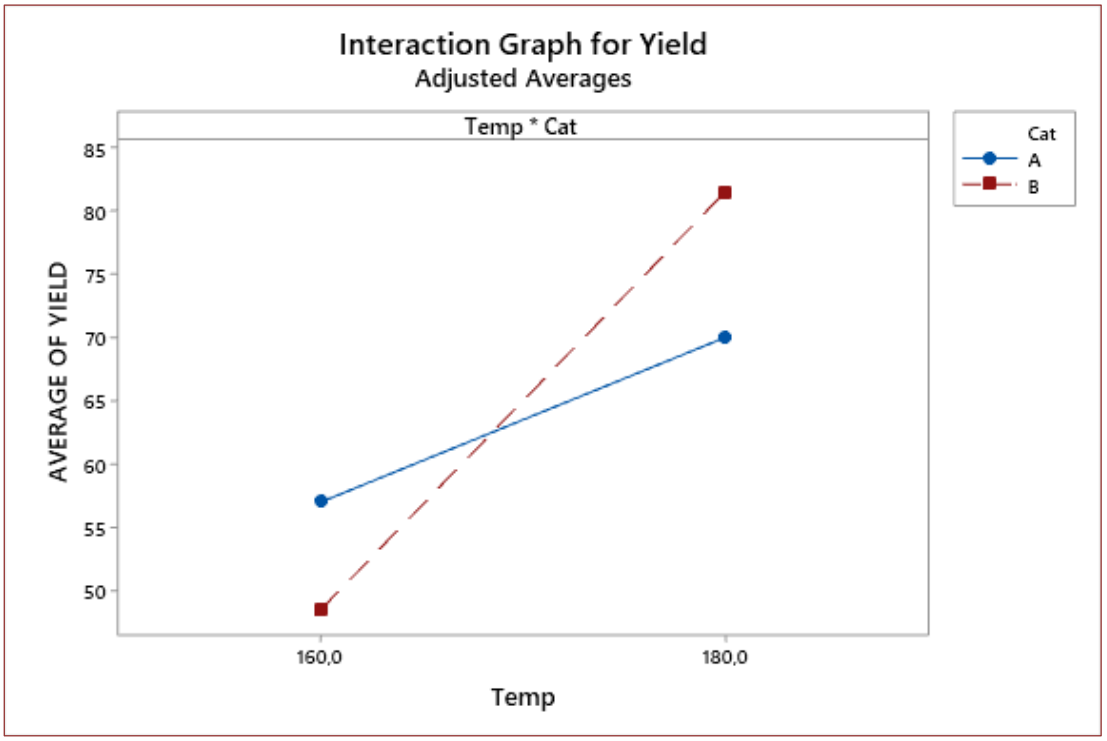
Figure 1 - Effect Graph for Factors and Interactions



Source: Authors (2026).

The Pareto Chart in Figure-1 shows that Factors A and B and Interaction AC are significant, so it was studied Factor B and Interaction AC and discard Factor A in isolation, as it makes no sense to analyze the Factor in isolation if it interacts with another Factor.

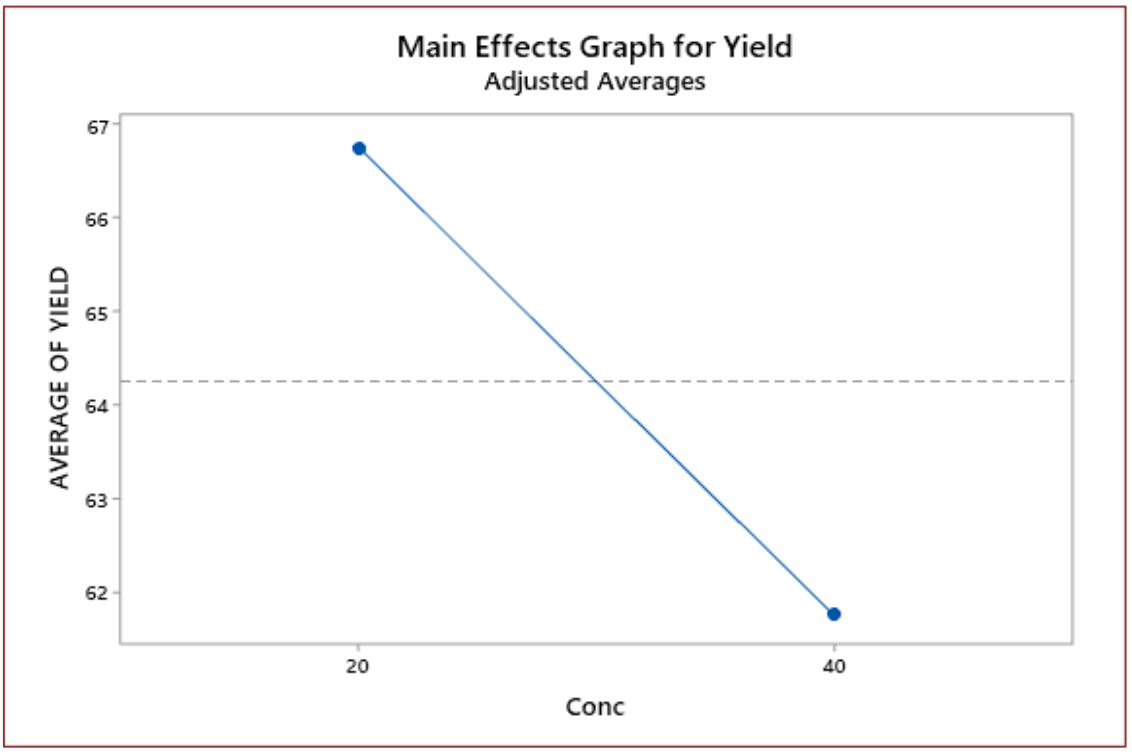
Figure 2 - Graph of AC Interaction Effects (TempxCat)



Source: Authors (2026).

Looking at the graph, the result that brings the highest value for the Response Variable (Yield) is the Temperature of 180oC and Catalyst B. They are therefore considered the perfect combination of Levels to achieve the highest possible Yield value.

Figure 3 - Graph of Effects for the Concentration Factor



Source: Authors (2026).

The best yield results appear when the concentration is equal to 20. Regression Equation shows the model with Yield as the Dependent Variable and Factors A, B and C as Independent Variables. This equation is suitable for predicting other yield Values.

$$\text{Yield in tons} = 2{,}717 - 0{,}113\,A + 0{,}212\,B + 0{,}033\,C \quad (1)$$

6. CONCLUSION

It can be concluded that Full Factorial Experiments are a very viable option for optimizing the performance of industrial processes. In this specific case of the plant, it can be concluded that the significant Factors are A (Temperature) and B (Concentration) and the Interaction AC (Temperature x Catalyst). In addition, in the AC Interaction, the best result is obtained when using a temperature of 180oC and Catalyst B, and for Main Effect B (Concentration) the best result is obtained when using a concentration of 20 mg/L.

REFERÊNCIAS

[1] Abraão, R. P., Sampaio, N. A. de S., & Mühlen, C. von. (2025). *Statistical analysis and prediction via neural networks of water quality in the Middle Paraíba do Sul (Rio de Janeiro State , Brazil) region in the period (2012 – 2022). 0123456789*. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36276-9

[2] Antônio, N., Sampaio, D. S., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Diniz, G., Mazza, F. C., Ercio, J., Junior, M., Kawakani, M. L., & Isaac, G. (2025). *APPLICATIONOF FULL FACTORIAL PLANNING TO CONTROL NITROGEN IN A WATER RESOURCE*. 1–13. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-128

[3] Bennington, C. C., & Thayne, W. V. (1994). Use and Misuse of Mixed Model Analysis of Variance in

Ecological Studies. *Ecology*, *75*(3), 717–722.

[4] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[5] Costa de Siqueira, J., Kazue Sakomura, N., Cardoso Nagib Nascimento, D., & Batista Kochenborger Fernandes, J. (2009). *Revista Brasileira de Zootecnia Modelos matemáticos para estimar as exigências de lisina digestível para aves de corte ISA Label*. *9*, 1732–1737. www.sbz.org.br

[6] Deus, D. M. de, Carvalho, C. P. de, Mazza, F. C., Siqueira, S. S. S. de, Junior, J. E. M., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Using analysis of variance and tukey's test to compare four Brands of industrial paint. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(2), 1–12. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-161

[7] Espuny, A. L. G., Espuny, M., Costa, A. C., da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & de Oliveira, O. J. (2023). Determinants of Intent To Purchase Organic Products To Improve Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, *17*(2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[8] Gomes, F. M., Pereira, F. M., Silva, A. F., & Silva, M. B. (2019). Multiple response optimization: Analysis of genetic programming for symbolic regression and assessment of desirability functions. *Knowledge-Based Systems*, *179*, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.05.002

[9] Nahm, F. S. (2016). *concept and the practical use*. https://doi.org/10.4097/kjae.2016.69.1.8

[10] Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Sampaio, N. A. de S., de Barros, J. G. M., Barbosa, L. C. F. M., & Oliveira, O. J. de. (2022). Mapping Sustainability 4 . 0 : contributions and limits of the symbiosis between technology and sustainable development Mapeamento de Sustentabilidade 4 . 0 : contribuições e limites da simbiose entre tecnologia e desenvolvimento sustentável. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(3), 1426–1438. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1417

Capítulo 13

Avaliação do impacto do tamanho amostral na síntese de dados tabulares via CTGAN para problemas de regressão: um estudo de prova de conceito em cenário controlado

Rosalvo Ferreira de Oliveira Neto

Resumo: Este trabalho apresenta uma prova de conceito em ambiente controlado para investigar o impacto do tamanho amostral na utilidade preditiva de dados sintéticos gerados pelo modelo CTGAN (Conditional Tabular Generative Adversarial Network) em um cenário simplificado de regressão tabular, composto exclusivamente por variáveis numéricas informativas. Foram conduzidos experimentos com cinco tamanhos de amostra (50, 100, 300, 1.000 e 2.000 instâncias), extraídas de uma população sintética de 3.000 exemplos, considerando alvos lineares e não lineares. Os modelos Random Forest, KNN, Regressão Linear e SVM foram avaliados por meio de validação cruzada 5-fold. Os resultados indicam que, no cenário linear, amostras a partir de 300 instâncias já permitem desempenho preditivo satisfatório, ainda que inferior ao obtido com dados reais de mesmo tamanho. Em contraste, no cenário não linear, o CTGAN apresentou limitações mesmo com 2.000 amostras de treinamento, sugerindo que, neste contexto controlado, os dados sintéticos não preservam adequadamente a estrutura necessária para substituir amostras reais em relações mais complexas.

Palavras Chave: dados sintéticos, CTGAN, regressão tabular, tamanho amostral, aprendizado de máquina.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Shi et al. (2025), a geração de dados tabulares sintéticos enfrenta desafios significativos devido à natureza única desse formato de dados em comparação com textos ou imagens. Entre as principais limitações desses métodos, podem ser destacados:

- Heterogeneidade e estruturas diversas: ao contrário de imagens (pixels) ou textos(tokens), os dados tabulares misturam variáveis categóricas e numéricas com propriedades estatísticas distintas, o que dificulta a modelagem da distribuição conjunta. Além disso, colunas individuais podem conter tipos de dados mistos (numéricos e categóricos na mesma coluna), complicando as estratégias tradicionais de codificação.
- Dependências complexas e esparsas: os dados tabulares frequentemente possuem relações complexas entre colunas (por exemplo, idade e nível de escolaridade), mas essas relações são geralmente esparsas, o que significa que apenas alguns pares de variáveis estão correlacionados. Capturar essas dependências com precisão é crucial para o realismo dos dados sintéticos.
- Distribuições não gaussianas e desequilíbrio: atributos numéricos frequentemente exibem assimetria, caudas pesadas ou características multimodais, enquanto colunas categóricas costumam ser altamente desequilibradas. Isso pode levar os modelos a sofrerem de overfitting nas classes dominantes, resultando em representação pobre das classes minoritárias e menor diversidade nos dados gerados.
- Inconsistência semântica (falta de senso comum e lógica): modelos que aprendem apenas distribuições estatísticas podem gerar amostras logicamente impossíveis, como idades negativas ou crianças indicadas como casadas. Mesmo modelos baseados em Grandes Modelos de Linguagem (LLMs), que possuem conhecimento prévio, podem sofrer com o "problema da alucinação", produzindo amostras com rótulos incorretos.
- Dilema entre utilidade e privacidade: existe um desafio contínuo em equilibrar a fidelidade dos dados (utilidade) com a proteção da privacidade. Modelos que geram dados muito precisos podem acabar memorizando registros reais, tornando-os vulneráveis a ataques de inferência de associação ou de atributos.
- Escassez de dados: o tamanho limitado dos conjuntos de dados é identificado como um dos principais desafios para o treinamento de modelos generativos, especialmente em domínios especializados como saúde, finanças e agricultura. Conjuntos pequenos restringem a confiabilidade dos dados sintéticos gerados.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe-se a responder à seguinte questão de pesquisa: "Qual é o tamanho mínimo de amostra necessário para que modelos generativos treinados em pequenos conjuntos de dados sejam eficazes em problemas de regressão tabular?"

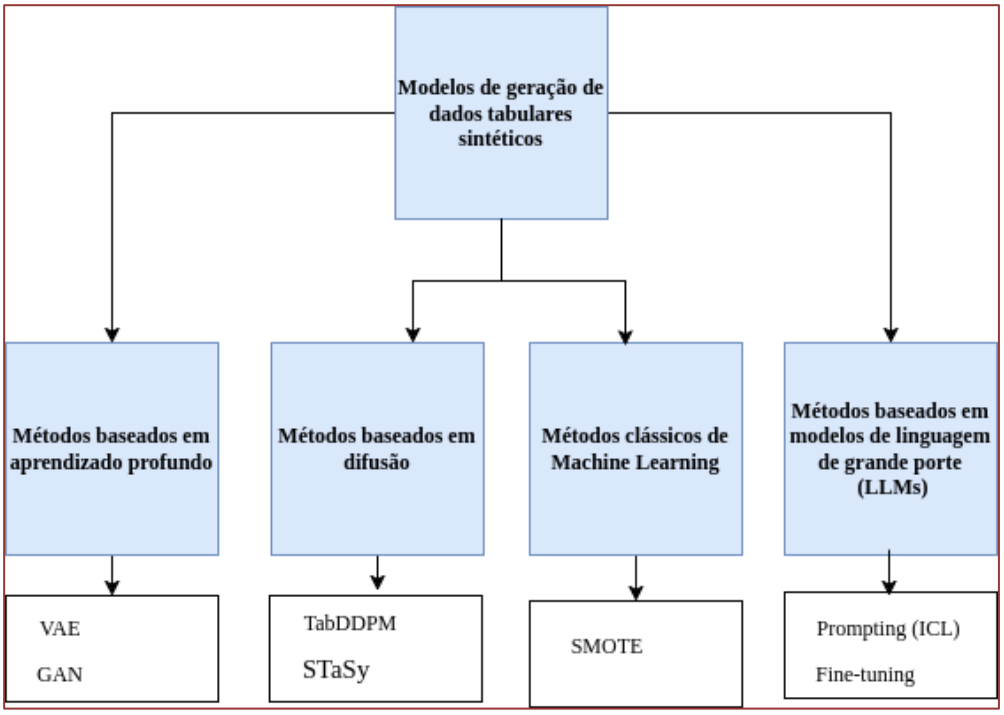
O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os principais modelos para geração de dados tabulares sintéticos. A Seção 3 descreve o modelo CTGAN (Conditional Tabular Generative Adversarial Network), utilizado neste estudo. A Seção 4 detalha a metodologia adotada. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos e, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

2. MODELOS DE GERAÇÃO DE DADOS TABULARES SINTÉTICOS

Os modelos de geração de dados tabulares sintéticos podem ser organizados em quatro grandes categorias: (i) métodos baseados em aprendizado profundo, (ii) métodos baseados em modelos de difusão, (iii) métodos baseados em modelos de linguagem de grande porte (LLMs) e (iv) métodos clássicos de *Machine Learning* (SHI et al., 2025). A Figura 1 ilustra essa taxonomia, destacando as principais subdivisões e exemplos representativos de cada abordagem. A seguir, cada uma dessas categorias é discutida em maior detalhe.

Os métodos baseados em aprendizado profundo, como Autoencoders Variacionais (VAEs) (Kingma; Welling, 2014) e Redes Adversariais Generativas (GANs) (Goodfellow et al., 2014), representam um avanço significativo em relação a modelos estatísticos clássicos ao possibilitarem a modelagem de dependências não lineares complexas entre atributos tabulares heterogêneos (Shi et al., 2025). Os VAEs aprendem representações latentes por meio da maximização do *Evidence Lower Bound* (ELBO), utilizando arquiteturas codificador–decodificador. Modelos como o TVAE adaptam essa formulação ao domínio tabular por meio de estratégias específicas de pré-processamento e funções de perda customizadas (Xu et al., 2019). As GANs, por sua vez, formulam a geração de dados como um jogo adversarial entre um gerador e um discriminador. Extensões relevantes incluem as GANs condicionais, como o CTGAN, que introduzem vetores condicionais para lidar com variáveis categóricas desbalanceadas (Xu et al., 2019), e as GANs com privacidade diferencial, que incorporam ruído controlado para mitigar riscos de vazamento de informação sensível (Xie et al., 2018). Apesar de seu sucesso, esses métodos frequentemente sofrem com instabilidade de treinamento, colapso de modo e dificuldade em representar distribuições multimodais complexas (Shi et al., 2025; Xu et al., 2019).

Figura 1 - Taxonomia dos principais modelos de geração de dados tabulares sintéticos



Os métodos baseados em difusão constituem uma classe mais recente de modelos generativos baseados em verossimilhança, nos quais a geração ocorre por meio da reversão de um processo gradual de adição de ruído (Ho et al., 2020). Esses modelos têm se destacado no contexto tabular por apresentarem maior estabilidade de treinamento e melhor capacidade de representar distribuições multimodais quando comparados a GANs e VAEs (Kotelnikov et al., 2023). Abordagens como TabDDPM (Kotelnikov et al., 2023) e STaSy (Kim et al., 2023) adaptam modelos de difusão para dados tabulares ao empregar mecanismos específicos de remoção de ruído que consideram a heterogeneidade e as dependências estruturais entre atributos, resultando em amostras sintéticas de alta fidelidade estatística.

Os métodos baseados em LLMs exploram o conhecimento semântico e estrutural incorporado em modelos pré-treinados em larga escala. Diferentemente de abordagens puramente estatísticas, os LLMs são capazes de capturar restrições de senso comum e regras de domínio, como coerência lógica entre atributos (Borisov et al., 2023). Esses métodos operam principalmente em dois regimes: aprendizado por contexto (*in-context learning*), no qual exemplos tabulares são fornecidos como parte do *prompt* (Hegselmann et al., 2023), e *fine-tuning*, no qual o modelo é ajustado diretamente ao domínio tabular de interesse (Borisov et al., 2023). Embora promissores, esses métodos ainda enfrentam desafios relevantes, como o problema de alucinação, que pode resultar na geração de registros semanticamente inconsistentes ou incorretos (JI et al., 2023).

Por fim, os métodos clássicos de *Machine Learning* englobam abordagens baseadas em modelagem estatística explícita e técnicas de reamostragem. Essa categoria inclui modelos como cópulas (Patki et al., 2016), misturas gaussianas e redes bayesianas, bem como métodos amplamente utilizados para tratamento de desbalanceamento, como SMOTE e suas variantes (Chawla et al., 2002). Embora tenham desempenhado papel fundamental no desenvolvimento inicial da geração de dados tabulares sintéticos, esses métodos apresentam limitações significativas em cenários de alta dimensionalidade e na captura de dependências complexas entre atributos, especialmente quando comparados às abordagens baseadas em aprendizado profundo (Shi et al., 2025).

3. CONDITIONAL TABULAR GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK (CTGAN)

Um modelo generativo descreve como um conjunto de dados é produzido a partir de um modelo probabilístico subjacente. A partir da amostragem desse modelo, torna-se possível gerar novos dados que preservam as características estatísticas do conjunto original.

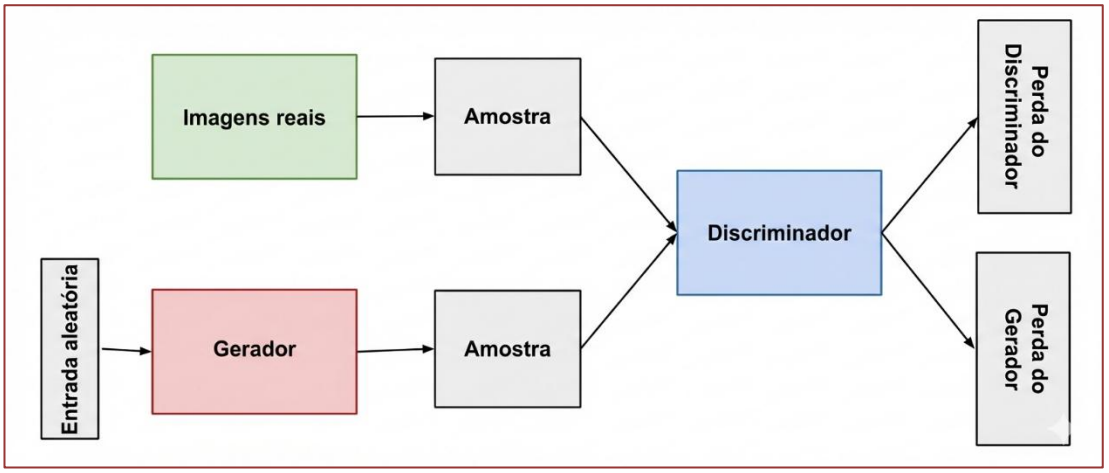
De maneira intuitiva, modelos generativos são capazes de criar novas instâncias de dados, enquanto modelos discriminativos têm como objetivo diferenciar ou classificar instâncias existentes (NG; Jordan, 2001). Por exemplo, um modelo generativo pode produzir novas imagens de animais que se assemelham a animais reais, ao passo que um modelo discriminativo é treinado para distinguir entre classes, como diferenciar um cachorro de um gato. Formalmente, dado um conjunto de instâncias de dados X e um conjunto de rótulos Y, modelos generativos aprendem a distribuição conjunta $p(X, Y)$, ou apenas a distribuição marginal $p(X)$ quando os rótulos não estão disponíveis (Goodfellow et al., 2016).

Além disso, um modelo generativo incorpora explicitamente a distribuição dos dados, permitindo estimar a probabilidade de ocorrência de um determinado exemplo. Modelos

que predizem a próxima palavra em uma sequência, por exemplo, são tipicamente generativos, pois atribuem probabilidades a sequências completas de palavras, possibilitando a geração de novos textos coerentes.

Nesse contexto, as GANs destacam-se como uma das abordagens mais bem-sucedidas em modelagem generativa (Goodfellow et al., 2014). As GANs são compostas por dois modelos treinados de forma adversarial: um gerador, responsável por produzir novas amostras de dados a partir de ruído aleatório, e um discriminador, cujo papel é distinguir entre dados reais e dados sintéticos. Esse processo competitivo conduz o gerador a produzir amostras cada vez mais realistas, até que se tornem difíceis de distinguir dos dados reais. A Figura 2 ilustra a arquitetura básica de uma GAN e o fluxo de treinamento adversarial entre o gerador e o discriminador.

Figura 2 - Arquitetura básica de uma rede GAN



Devido a essa capacidade, as GANs têm sido amplamente empregadas em aplicações do mundo real, incluindo a geração de imagens, textos e vídeos. No entanto, quando aplicadas a dados tabulares, as GANs convencionais apresentam limitações significativas, uma vez que esse tipo de dado envolve características específicas, tais como a presença de tipos de dados mistos (contínuos e categóricos), distribuições não gaussianas, dependências complexas entre atributos e desbalanceamento em colunas discretas (Xu et al., 2019).

Com o objetivo de contornar essas dificuldades, foi proposto o CTGAN, um método baseado em GANs projetado especificamente para modelar a distribuição de dados tabulares e gerar amostras sintéticas realistas (Xu et al., 2019). O CTGAN introduz mecanismos condicionais e estratégias de modelagem que permitem lidar adequadamente com a heterogeneidade dos atributos e com o desbalanceamento das variáveis categóricas, tornando-se uma abordagem mais adequada para a geração de dados sintéticos em cenários tabulares complexos.

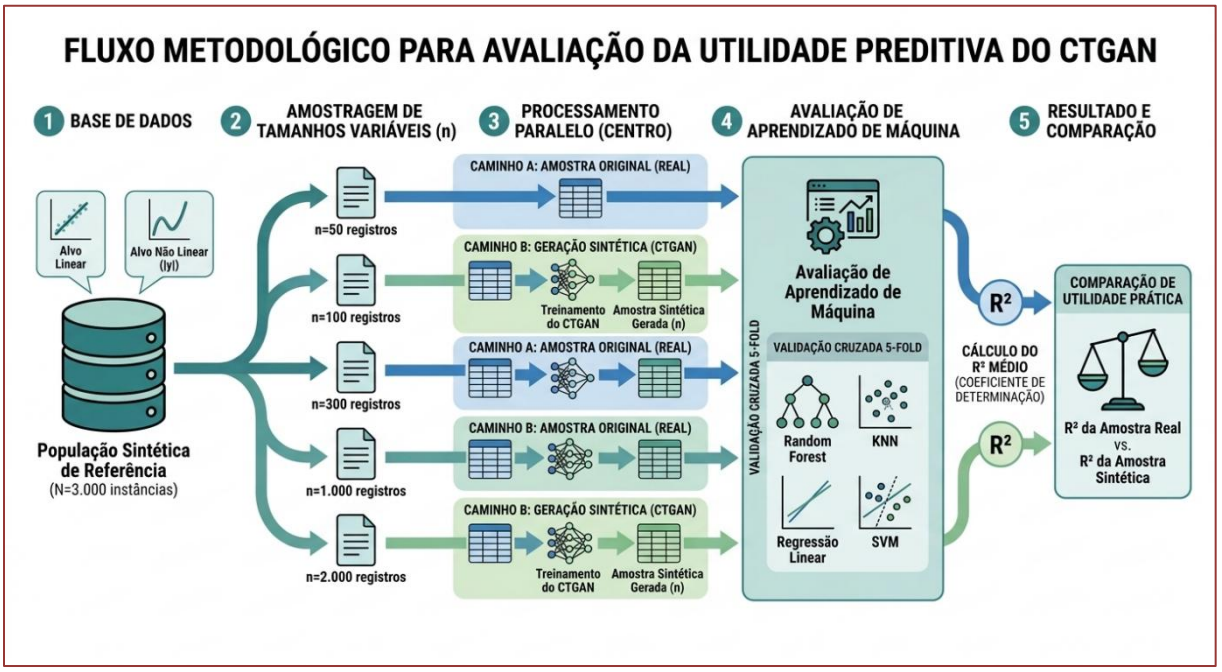
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para responder à questão de pesquisa formulada, conduziu-se um estudo experimental baseado na variação do tamanho de cinco amostras. A população original de cada conjunto

compreende 3.000 instâncias. A partir desse universo, foram extraídas amostras contendo 50, 100, 300, 1.000 e 2.000 registros para análise comparativa.

O procedimento experimental consistiu em uma avaliação comparativa dos modelos de aprendizado de máquina *Random Forest* (RF) (Breiman, 2001), *k-Nearest Neighbors* (KNN) (Cover; Hart, 1967), Regressão Linear (Montgomery; Peck; Vining, 2012) e *Support Vector Machines* (SVM) (Cortes; Vapnik, 1995), utilizando tanto as amostras originais quanto as sintetizadas via CTGAN (Xu et al., 2019), a qual foi treinada com os dados originais. Para cada cenário e tamanho amostral, foram calculados dois coeficientes de determinação médios (R^2) por meio de validação cruzada *5-fold*: um referente à amostra original e outro à amostra sintetizada. Essa abordagem permitiu mensurar a manutenção da utilidade preditiva dos dados gerados em comparação aos dados reais. A Figura 3 ilustra este fluxo experimental.

Figura 3 - Metodologia Experimental



4.1. BASE DE DADOS

A base de dados experimental compreende conjuntos sintéticos estruturados com dois perfis distintos de variáveis-alvo: linear e não linear. Inicialmente, os dados foram gerados por meio da função *make_regression* da biblioteca scikit-learn, configurada para produzir um cenário de regressão com cinco variáveis de entrada, todas classificadas como informativas (Ferreira de Oliveira Neto, 2023). Enquanto a variável-alvo linear foi obtida diretamente do gerador, a variável não linear foi derivada da aplicação da função de valor absoluto ($|y|$) sobre a saída original, estabelecendo uma relação complexa entre os preditores e o alvo. Visando a estabilidade do treinamento da rede GAN, todos os atributos de entrada foram normalizados no intervalo [0, 1] por meio do método Min-Max.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores de R^2 médio obtidos para os modelos *Random Forest*, KNN, Regressão Linear e SVM, considerando amostras sintéticas geradas pelo CTGAN. Entre parênteses são apresentados os valores de R^2 médio correspondentes a modelos treinados com amostras da população original de mesmo tamanho, assumindo um alvo linear. Adicionalmente, a linha *Pop.* indica o desempenho obtido com a utilização de toda a população, representando o limite superior de desempenho para cada modelo.

De forma geral, observa-se que, para o alvo linear, todos os modelos apresentam melhora consistente de desempenho à medida que o tamanho da amostra aumenta. A Regressão Linear destaca-se nesse cenário, alcançando valores de R^2 iguais a 1,000 já para amostras reduzidas da população original, o que era esperado dado o alinhamento entre o modelo e a natureza linear do problema. Quando treinada com dados sintéticos gerados pelo CTGAN, a Regressão Linear mantém desempenho elevado, embora com valores ligeiramente inferiores, refletindo a perda inerente à aproximação da distribuição real dos dados.

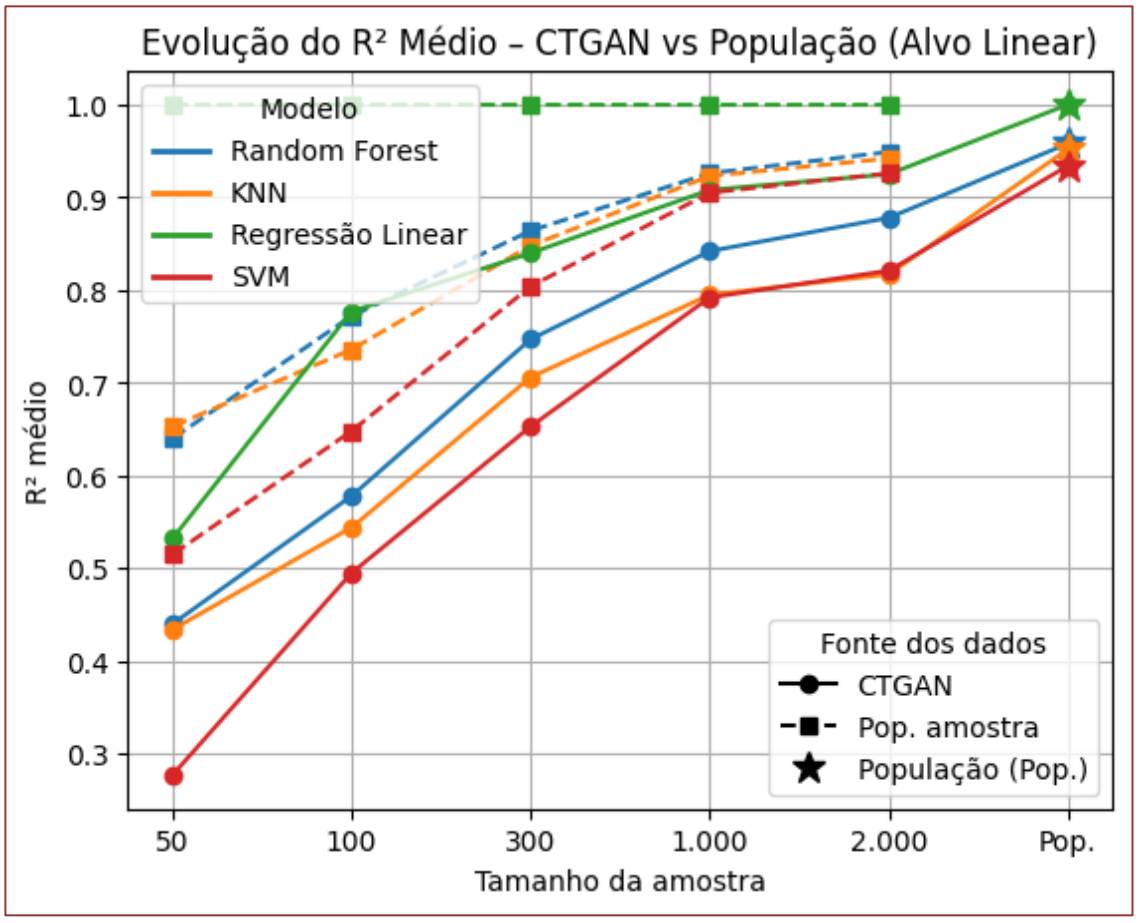
Tabela 1- Valores de R^2 médio para os modelos treinados com amostras geradas por CTGAN e, entre parênteses, com amostras da população original considerando o alvo linear

Tamanho da Amostra	Random Forest	KNN	Regressão Linear	SVM
50	0.440 (0.640)	0.434 (0.653)	0.532 (1.000)	0.277 (0.515)
100	0.578 (0.772)	0.544 (0.736)	0.777 (1.000)	0.495 (0.648)
300	0.747(0.864)	0.706 (0.848)	0.840 (1.000)	0.653 (0.804)
1.000	0.842 (0.926)	0.795 (0.923)	0.908 (1.000)	0.792 (0.905)
2.000	0.878 (0.949)	0.817 (0.942)	0.925 (1.000)	0.821 (0.926)
Pop.	**0.958**	**0.952**	**1.000**	**0.934**

A Figura 4 ilustra a evolução do R^2 médio em função do tamanho da amostra para os diferentes modelos. As curvas associadas aos dados sintéticos (linhas contínuas) mostram comportamento crescente e tendem a se aproximar das curvas de referência obtidas com dados da população original (linhas tracejadas), indicando que o CTGAN é capaz de preservar características relevantes da distribuição dos dados à medida que o volume amostral aumenta. O marcador em forma de estrela, correspondente à população completa, evidencia o desempenho assintótico de cada modelo.

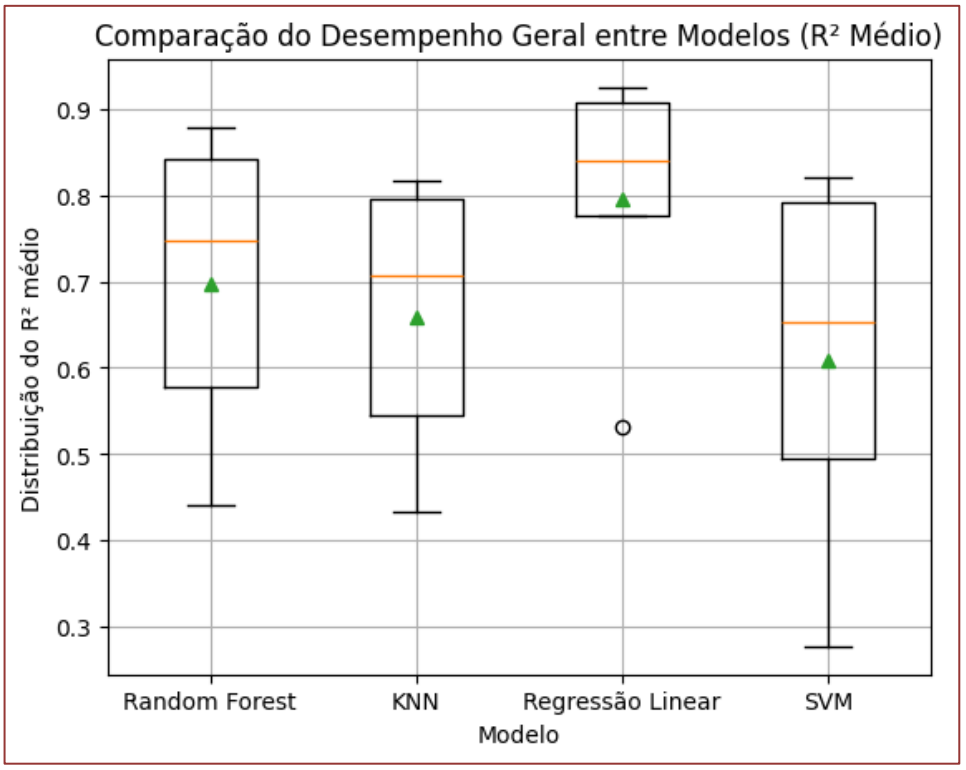
No cenário linear, Random Forest e KNN apresentam desempenho competitivo, especialmente para tamanhos de amostra superiores a 300 instâncias, enquanto o SVM apresenta crescimento mais gradual. Ainda assim, todos os modelos convergem para valores elevados de R^2 quando a amostra se torna suficientemente grande, reforçando a adequação do uso de dados sintéticos para tarefas de regressão linear.

Figura 4- Evolução do R^2 médio em função do tamanho da amostra para os diferentes modelos, considerando dados sintéticos (CTGAN), amostras da população e a população completa (alvo linear)



A Figura 5 complementa essa análise por meio de boxplots que sintetizam a distribuição do R^2 médio ao longo dos diferentes tamanhos de amostra. Observa-se que a Regressão Linear apresenta a maior mediana e a menor variabilidade, confirmando sua estabilidade e superioridade no contexto linear. Random Forest e KNN apresentam desempenho intermediário com maior dispersão, enquanto o SVM apresenta maior variabilidade relativa.

Figura 5 - Boxplot da distribuição do R^2 médio para os modelos Random Forest, KNN, Regressão Linear e SVM considerando dados gerados por CTGAN (alvo linear)



A Tabela 2 apresenta os resultados correspondentes ao alvo não linear. Nesse cenário, a Regressão Linear apresenta valores de R^2 próximos de zero ou negativos, tanto para dados sintéticos quanto para dados da população original, evidenciando sua inadequação para modelar relações não lineares. Em contraste, os modelos *Random Forest*, KNN e SVM apresentam melhora progressiva de desempenho com o aumento do tamanho da amostra. Esse comportamento é visualmente confirmado na Figura 6, que evidencia a tendência crescente do R^2 médio com o aumento do tamanho da amostra para os modelos não lineares, bem como o descolamento da Regressão Linear, que permanece próxima de zero ou negativa ao longo dos experimentos.

Entre os modelos não lineares, o SVM destaca-se por apresentar os maiores valores de R^2 médio, aproximando-se do desempenho obtido com a população completa. Random Forest também apresenta desempenho robusto, especialmente para amostras maiores, enquanto o KNN mantém desempenho intermediário, com maior sensibilidade ao tamanho da amostra.

A Figura 7 complementa essa análise por meio do boxplot, sintetizando a distribuição dos valores de R^2 ao longo dos tamanhos de amostra. Observa-se que o SVM apresenta maior mediana de desempenho, enquanto Random Forest e KNN permanecem em patamar intermediário; a Regressão Linear forma um agrupamento claramente inferior, reforçando sua inadequação para o alvo não linear.

Tabela 2 - Valores de R^2 médio para os modelos treinados com amostras geradas por CTGAN e, entre parênteses, com amostras da população original considerando o alvo não linear

Tamanho da Amostra	Random Forest	KNN	Regressão Linear	SVM
50	0.140 (0.164)	0.130 (0.153)	-0.060 (-0.350)	0.125 (0.408)
100	0.132 (0.248)	0.201 (0.391)	-0.127 (-0.205)	0.420 (0.561)
300	0.328 (0.588)	0.379 (0.596)	-0.039 (0.025)	0.491 (0.722)
1.000	0.503 (0.794)	0.435 (0.789)	-0.046 (-0.010)	0.621 (0.846)
2.000	0.557 (0.847)	0.488 (0.841)	-0.026 (-0.004)	0.628 (0.886)
Pop.	**0.873**	**0.865**	**-0.004**	**0.900**

Figura 6. - Evolução do R^2 médio em função do tamanho da amostra para os diferentes modelos considerando dados sintéticos (CTGAN), amostras da população e a população completa (alvo não linear)

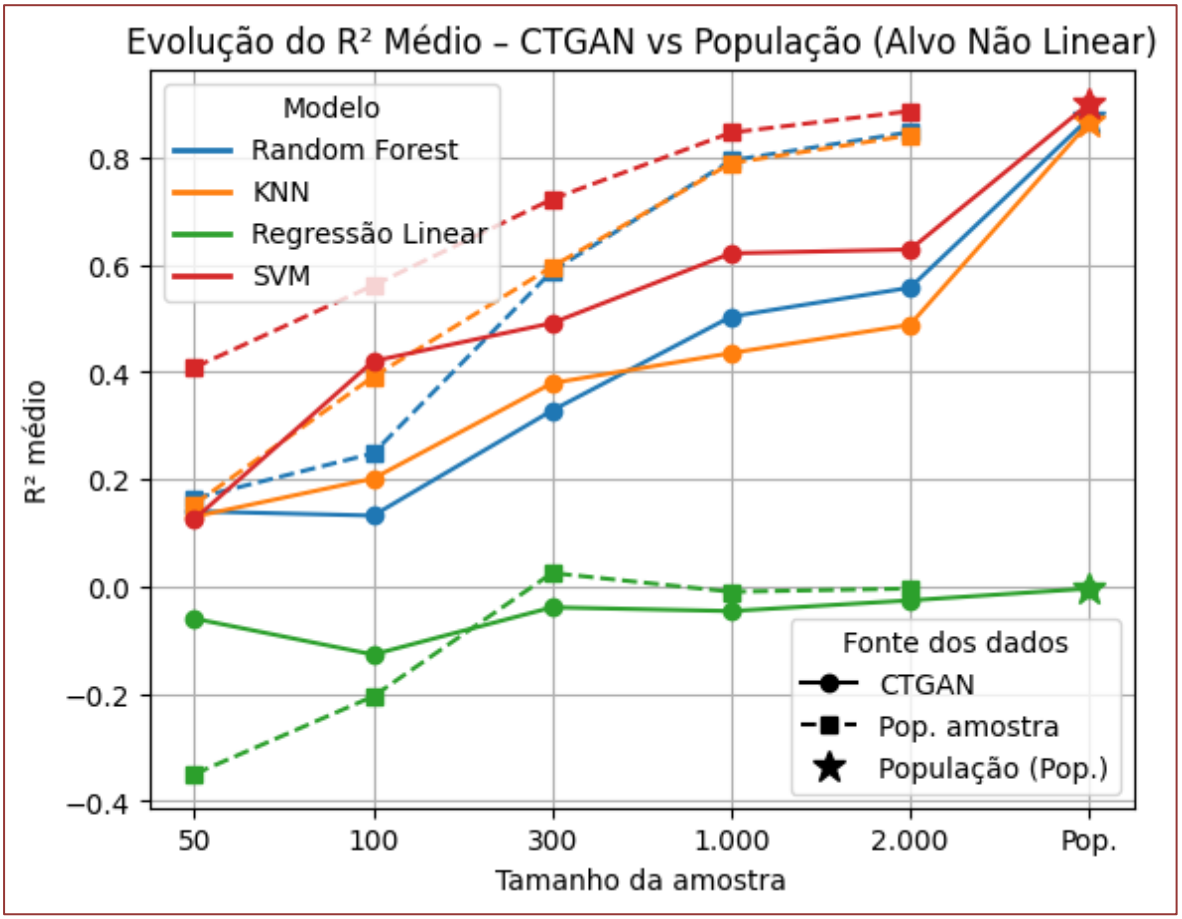
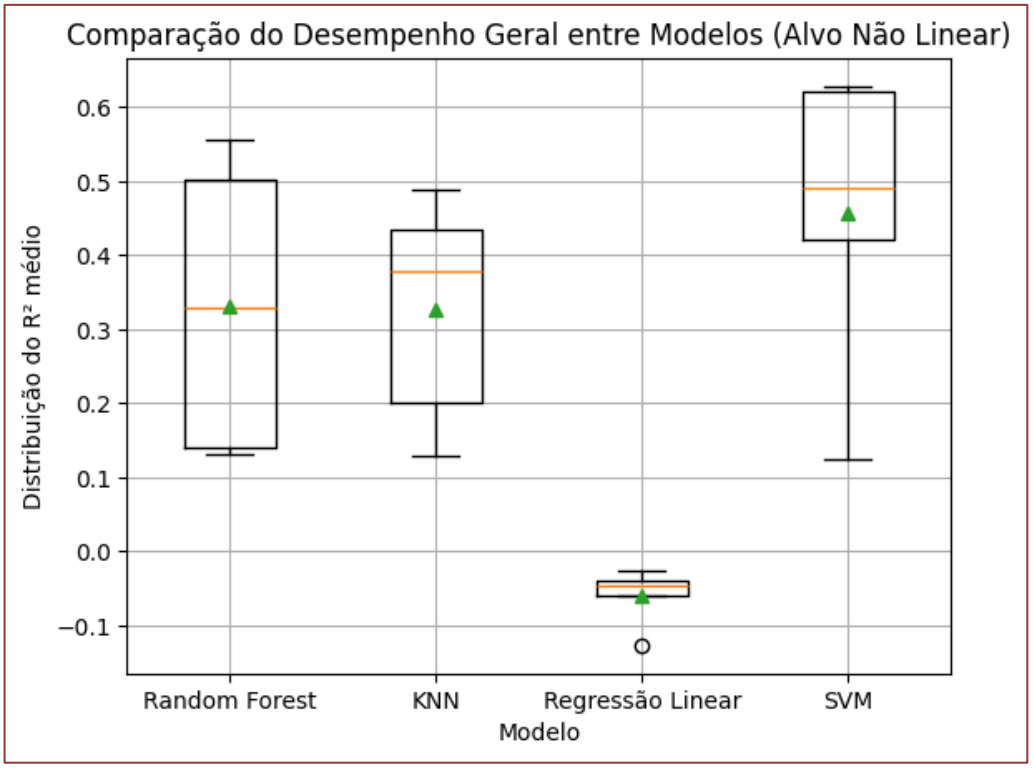


Figura 7 - Boxplot da distribuição do R^2 médio para os modelos Random Forest, KNN, Regressão Linear e SVM considerando dados gerados por CTGAN (alvo não linear)



A análise conjunta das Figuras 4, 5, 6 e 7 e das Tabelas 1 e 2 indica que a qualidade das amostras geradas pelo CTGAN é fortemente dependente de dois fatores principais: (i) a complexidade da relação entre as variáveis de entrada e a variável-alvo e (ii) o tamanho da amostra utilizada para o aprendizado da distribuição dos dados. Embora o problema investigado envolva apenas cinco variáveis de entrada, os resultados mostram que, em regimes de baixa disponibilidade de dados, o CTGAN apresenta limitações significativas na geração de amostras com qualidade suficiente para sustentar modelos preditivos competitivos.

Para o cenário linear, observa-se que amostras sintéticas geradas a partir de conjuntos com aproximadamente 300 instâncias já permitem o treinamento de modelos com desempenho elevado, ainda que inferior àquele obtido com amostras reais da população de mesmo tamanho. Em contraste, no cenário não linear, mesmo com 2.000 amostras sintéticas, os modelos treinados a partir de dados gerados pelo CTGAN permanecem substancialmente abaixo do desempenho obtido quando treinados diretamente com amostras reais da população, conforme evidenciado nas Figuras 4 e 5.

Esses resultados sugerem que, mesmo em problemas de baixa dimensionalidade, a geração de dados sintéticos por modelos generativos adversariais tabulares não é capaz de compensar a escassez de dados reais quando a relação entre entrada e saída é não linear. A discrepância observada entre o desempenho dos modelos treinados com dados sintéticos e aqueles treinados com dados reais da população reforça que o CTGAN não preserva adequadamente a estrutura estatística necessária para generalização em cenários complexos quando treinado com poucas observações.

Dessa forma, os resultados deste estudo indicam que o uso do CTGAN como estratégia de aumento de dados deve ser adotado com cautela em cenários de dados escassos, mesmo quando o número de variáveis de entrada é reduzido. Nessas condições, o treinamento direto com amostras reais da população, ainda que pequenas, tende a produzir modelos mais confiáveis do que aqueles treinados com dados sintéticos gerados a partir de distribuições insuficientemente aprendidas.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou, em um ambiente controlado, o impacto do tamanho amostral na utilidade preditiva de dados sintéticos gerados pelo CTGAN para problemas de regressão tabular, considerando dois cenários distintos: alvos lineares e não lineares. Os experimentos foram conduzidos com cinco tamanhos de amostra (50, 100, 300, 1.000 e 2.000 instâncias), extraídas de uma população sintética de 3.000 exemplos, e os modelos Random Forest, KNN, Regressão Linear e SVM foram avaliados por validação cruzada 5-fold.

Os resultados demonstram que, no cenário de alvo linear, o CTGAN é capaz de gerar dados sintéticos com utilidade preditiva suficiente para sustentar modelos competitivos a partir de amostras com aproximadamente 300 instâncias. Nesse contexto, a Regressão Linear apresentou o melhor desempenho, em consonância com a natureza linear do problema, enquanto Random Forest e KNN mostraram-se robustos para amostras maiores.

Por outro lado, no cenário de alvo não linear, o CTGAN demonstrou limitações substanciais mesmo com 2.000 instâncias de treinamento. Os dados sintéticos gerados mostraram-se insuficientes para capturar adequadamente a estrutura da relação não linear entre as variáveis, resultando em desempenho consistentemente inferior ao obtido com amostras reais da população. O SVM foi o modelo não linear com melhor desempenho nesse cenário, enquanto a Regressão Linear mostrou-se inadequada para esse tipo de problema.

Esses achados contribuem para a compreensão dos limites práticos do uso de modelos generativos adversariais tabulares em regimes de escassez de dados, evidenciando que a complexidade da relação entre variáveis de entrada e variável-alvo é um fator determinante para a eficácia da síntese de dados. Cabe destacar, contudo, que os resultados foram obtidos em um cenário controlado, com variáveis exclusivamente numéricas e informativas, o que restringe a generalização das conclusões. Em particular, o limiar de aproximadamente 300 instâncias identificado para o cenário linear deve ser interpretado com cautela, pois a introdução de variáveis categóricas desbalanceadas, ruído estrutural ou maior heterogeneidade, características comuns em dados reais, poderia alterar esse valor de forma relevante.

Essas limitações delineiam direções promissoras para investigações futuras. Recomenda-se avaliar o comportamento do CTGAN em cenários com maior número de variáveis e maior complexidade estrutural, comparar seu desempenho com modelos de difusão tabular, como o TabDDPM, investigar estratégias híbridas que combinem dados sintéticos e reais, e explorar conjuntos de dados reais em domínios como saúde, finanças e agricultura, nos quais a escassez de dados é um desafio recorrente.

REFERÊNCIAS

[1] BORISOV, V. et al. Language models are realistic tabular data generators. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING REPRESENTATIONS (ICLR), 11., 2023. Anais... [S. l.]: OpenReview.net, 2023.

[2] BREIMAN, L. Random forests. Machine Learning, v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

[3] CHAWLA, N. V. et al. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. Journal of Artificial Intelligence Research, v. 16, p. 321–357, 2002.

[4] CORTES, C.; VAPNIK, V. Support-vector networks. Machine Learning, v. 20, n. 3, p. 273–297, 1995.

[5] COVER, T. M.; HART, P. E. Nearest neighbor pattern classification. IEEE Transactions on Information Theory, v. 13, n. 1, p. 21–27, 1967.

[6] FERREIRA DE OLIVEIRA NETO, R. Geração de dados sintéticos tabulares para problemas de regressão. [S. l.: s. n.], 2023.

[7] GOODFELLOW, I. et al. Generative adversarial nets. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NIPS), 27., 2014. Anais... [S. l.]: Curran Associates, 2014. p. 2672–2680.

[8] GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. Deep learning. Cambridge: MIT Press, 2016.

[9] HEGSELMANN, S. et al. TabLLM: Few-shot classification of tabular data with large language models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND STATISTICS (AISTATS), 26., 2023. Anais... [S. l.]: PMLR, 2023.

[10] HO, J.; JAIN, A.; ABBEEL, P. Denoising diffusion probabilistic models. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NeurIPS), 33., 2020. Anais... [S. l.]: Curran Associates, 2020. p. 6840–6851.

[11] JI, Z. et al. Survey of hallucination in natural language generation. ACM Computing Surveys, v. 55, n. 12, p. 1–38, 2023.

[12] KIM, J. et al. STaSy: Score-based tabular data synthesis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING REPRESENTATIONS (ICLR), 11., 2023. Anais... [S. l.]: OpenReview.net, 2023.

[13] KINGMA, D. P.; WELLING, M. Auto-encoding variational bayes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING REPRESENTATIONS (ICLR), 2., 2014. Anais... [S. l.]: OpenReview.net, 2014.

[14] KOTELNIKOV, A. et al. TabDDPM: Modelling tabular data with diffusion models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING (ICML), 40., 2023. Anais... [S. l.]: PMLR, 2023. p. 17564–17579.

[15] MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. Introduction to linear regression analysis. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

[16] NG, A. Y.; JORDAN, M. I. On discriminative vs. generative classifiers: a comparison of logistic regression and naive Bayes. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NIPS), 14., 2001. Anais... [S. l.]: MIT Press, 2001. p. 841–848.

[17] PATKI, N.; WEDGE, R.; VEERAMACHANENI, K. The synthetic data vault. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA SCIENCE AND ADVANCED ANALYTICS (DSAA), 3., 2016. Anais... [S. l.]: IEEE, 2016. p. 399–410.

[18] SHI, Z. et al. A comprehensive survey on generative tabular data modeling. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2025. No prelo.

[19] XIE, L. et al. Differentially private generative adversarial network. arXiv preprint arXiv:1802.06739, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1802.06739>. Acesso em: jan. 2025.

[20] XU, L. et al. Modeling tabular data using conditional GAN. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NeurIPS), 32., 2019. Anais... [S. l.]: Curran Associates, 2019. p. 7335–7345.

Capítulo 14

Riscos psicossociais no trabalho: conceitos, complexidade de identificação e o nexo causal com o ambiente laboral

José Antonio Poletto Filho
Vanessa Aparecida Sanches Campassi de Oliveira

Resumo: O risco psicossocial no ambiente de trabalho vem ganhando importância nas discussões contemporâneas em saúde e segurança do trabalho, especialmente diante das transformações no mercado de trabalho e nas formas de organização laboral. Desta forma o presente trabalho objetivou avaliar os fatores psicossociais em uma comunidade de professores utilizando o questionário Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ II – versão curta). O grupo focal foi composto por 50 docentes e os resultados foram analisados em escala de 0 a 100 pontos. Da observação dos resultados nota-se elevada exposição a demandas quantitativas (78), ritmo de trabalho (82) e demandas emocionais (75), além de altos níveis de estresse (76) e Síndrome de Burnout (71). Em contrapartida, identificou-se forte percepção da importância do trabalho (88) e bom relacionamento social entre colegas (70). A conclusão é que estes profissionais estão expostos a um nível alto de risco psicossocial, sendo necessárias intervenções organizacionais e preventivas. Conclui-se que a identificação eficaz dos riscos psicossociais depende de uma abordagem multiprofissional, que considere não apenas aspectos técnicos, mas também a percepção dos trabalhadores e o contexto organizacional.

Palavras-chave: riscos psicossociais, COPSOQ II, professores, saúde do trabalhador, estresse ocupacional, saúde mental no trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O risco psicossocial no trabalho contempla às interações entre o conteúdo do trabalho (ergonomia cognitiva), a forma de organização (ergonomia organizacional), a gestão do trabalho e as condições ambientais e sociais. Todos estes fatores podem impactar a saúde física e mental dos trabalhadores. No contexto da educação, estes riscos são intensificados por fatores como: sobrecarga de trabalho, pressão emocional e baixa autonomia.

Com a recente atualização da Norma Regulamentadora nº 1 (Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais), que passou a exigir a inclusão desses fatores no gerenciamento de riscos ocupacionais, torna-se essencial compreender de que forma a organização do trabalho pode impactar a saúde mental dos trabalhadores. Nesse cenário, destaca-se o Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ II), ferramenta amplamente utilizada para avaliação e mensuração destes fatores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2019) o ambiente do trabalho está passando por transformações significativas nas últimas décadas, a era da digitalização trouxe intensificação das demandas cognitivas e mudanças nas relações laborais. Neste cenário uma categoria de riscos que, embora não seja nova, passou a receber maior atenção foram os riscos psicossociais.

Diferentemente dos riscos físicos, químicos e biológicos, mais visíveis e mensuráveis, os riscos psicossociais estão relacionados à forma como o trabalho é organizado e às interações sociais no ambiente laboral. Por este motivo, sua identificação é mais complexa e depende da análise de fatores subjetivos e contextuais (Agência Européia para a Segurança e Saúde no Trabalho, 2014).

De acordo com dados sobre afastamentos por transtornos mentais do Instituto Nacional do Seguro Social, historicamente, a saúde mental no trabalho sempre foi tratada de forma secundária em relação à segurança física. No entanto, essa situação está mudando, à medida que transtornos mentais e comportamentais se consolidam como importantes causas de afastamento e perda de produtividade (OMS, 2017).

A atualização da NR-1 - Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais, com a inclusão dos fatores psicossociais no Gerenciamento de Riscos Ocupacionais, representa um avanço importante ao reconhecer formalmente a necessidade de gestão desses riscos (OMS, ILO-OSH 2001).

Diante desse contexto, o artigo em tela tem como objetivo discutir os fundamentos teóricos dos riscos psicossociais, os desafios metodológicos para sua identificação e as dificuldades no estabelecimento do nexo causal com o trabalho, contribuindo para uma atuação mais acertiva na área de Segurança e Saúde no Trabalho (Agência Européia para a Segurança e Saúde no Trabalho, 2018). Além disso foi aplicado o Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ II) para exemplificar os riscos psicossociais em um grupo de profissionais da área da educação.

Definir riscos psicossociais no trabalho não é uma tarefa simples, pois, trata de um tema que gera debates tanto na literatura acadêmica quanto na prática profissional, justamente por envolver diferentes áreas do conhecimento, como psicologia organizacional, medicina do trabalho e ergonomia, sua conceituação varia conforme a visão teórica adotada seja ela

da psicologia organizacional, medicina do trabalho ou ergonomia cognitiva (Rodrigues, 2020).

Ainda segundo Rodrigues (2020), de modo geral, o termo é utilizado para descrever situações em que aspectos da organização do trabalho e das relações interpessoais podem influenciar negativamente a saúde e o bem-estar dos trabalhadores. No entanto, sua compreensão exige a distinção entre fatores e riscos psicossociais.

Para melhor compreender os riscos psicossociais surgem modelos teóricos que tentam explicar como as demandas do trabalho interagem com os recursos psicológicos do trabalhador gerando estresse ou adoecimento.

A literatura apresenta dois modelos:

Modelo Demanda-Controle (Karasek, 1979): postula que o estresse laboral resulta da interação entre as demandas psicológicas do trabalho (volume, ritmo, prazos) e o controle que o trabalhador tem sobre suas tarefas considerando autonomia, uso de habilidades (Karasek, R. A, 1979). Este conceito está previsto na NR 17, Ergonomia, ou seja: o maior risco de adoecimento ocorre em situações de alta exigência, como em altas demandas e baixo poder de controle pelo trabalhador.

Modelo Desequilíbrio Esforço-Recompensa (Siegrist, 1996): considera que o estresse ocorre quando há um desequilíbrio entre o esforço pelo trabalhador, ou seja, as demandas e obrigações, com as baixas recompensas recebidas, salário, reconhecimento, segurança no emprego, oportunidades de carreira. Esse desequilíbrio pode gerar emoções negativas e ativações fisiológicas que podem acarretar o adoecimento cardiovascular e mental.

Comparativo entre os Modelos JDC e ERI

Característica	Modelo Demanda e controle - JDC	Modelo Esforço Recompensa - ERI
Foco	Conteúdo e organização da tarefa	Reciprocidade social
Variável chave	Autonomia, controle	Esforço, recompensa
Mecanismo de risco	Baixo controle, alta demanda	Baixa recompensa para alto esforço
Dimensão social	Apoio social	Reconhecimento, segurança

Outro modelo é o proposto por Demeroutiat AL (2001), Demandas e Recursos do Trabalho (JD-R): oferece uma visão mais flexível, propondo que demandas física, social ou organizacional, podem ser compensadas por recursos como autonomia, feedback e apoio, mas que o desequilíbrio crônico entre eles pode levar ao esgotamento e a Síndrome de Burnout.

Uma ferramenta para avaliação que está sendo utilizada é o Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ II) um instrumento amplamente usado para avaliar fatores psicossociais no trabalho. A versão COPSOQ II foi desenvolvida para ser mais abrangente e comparável internacionalmente, possui três versões principais, adaptadas ao nível de profundidade desejada (Revista de Saúde Pública, 2021):

Versão longa (long version): aproximadamente 120 a 130 itens, utilizada em pesquisa acadêmica detalhada é mais completa, portanto, mais demorada, mas avalia muitas dimensões com alta precisão.

Versão média (médium version): com 70 a 90 itens, apresenta um equilíbrio entre profundidade e praticidade, utilizada organizações e estudos aplicados.

Versão curta (short version): mais rápida com apenas 40 a 50 itens, aplicação rápida, ideal para triagem inicial, pesquisas com pouco tempo disponível ou monitoramento geral do ambiente psicossocial

A versão curta do COPSOQ II, utilizada no trabalho em tela, foi criada para reduzir o tempo de aplicação, mantendo os principais domínios psicossociais. Ela inclui um número reduzido de escalas, focando nos fatores mais críticos.

As principais dimensões avaliadas são: demandas do trabalho, avaliando a carga e ritmo da atividade, controle e autonomia, determina quanto o trabalhador pode interferir no andamento da tarefa executada, apoio social, observa o relacionamento entre os colegas e a postura da liderança, reconhecimento, identifica como o gestor reconhece o empenho dos colaboradores; conflito trabalho–vida, indica como o trabalho interfere na vida pessoal do trabalhador e por fim estresse e bem-estar, quanto as demandas do trabalho estão interferindo com a saúde emocional dos colaboradores (Revista de Saúde Pública, 2021).

Esta versão tem como vantagens a rapidez e facilidade de aplicação e bom diagnostico inicial. Mas apresenta algumas limitações, como: menor detalhamento, não capta situações específicas, menos robusta para análises científicas profundas. É uma ferramenta mais enxuta que permite avaliar rapidamente os principais riscos psicossociais no trabalho, sendo ideal para contextos práticos onde tempo e simplicidade são essenciais.

Estrutura: A versão curta tem entre 40 a 50 questões, organizadas em 05 dimensões:

Demandas do trabalho: abordam a quantidade, ritmo, exigências emocionais relacionadas ao trabalho,

Organização e conteúdo do trabalho: considera a influência e autonomia do trabalhador na execução do trabalho,

Relações sociais e liderança: como a liderança conduz os conflitos no trabalho,

Interface trabalho na vida pessoal, Saúde e bem-estar: leva em consideração como o trabalho interfere na saúde emocional do trabalhador, estresse, satisfação, e Síndrome de Burnout,

Interpretar os resultados do Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ II) – versão curta envolve transformar respostas em escores e analisar o que eles indicam sobre o ambiente de trabalho.

Como interpretar os resultados: A maioria das perguntas usa escala tipo Likert, por exemplo: sempre, frequentemente, às vezes, raramente, nunca. Cada resposta recebe um valor numérico, conforme Tabela 1.

Tabela 1: pontuação

Resposta	Pontuação
Sempre	100
Freqüentemente	75
Às vezes	50
Raramente	25
Nunca	0

Fonte: COPSOQ II.

A pontuação é calculada pela média das pontuações por dimensão, e o resultado é sempre entre 0 e 100 pontos.

Na dimensão de risco que englobam exigências quantitativas, estresse, conflito trabalho-família, quanto maior o valor pior a situação (Tabela 2).

Tabela 2: dimensão de risco

Pontuação	Interpretação
0–33	Baixo risco
34–66	Risco moderado
67–100	Alto risco

Fonte: COPSOQ II.

Para as dimensões positivas: apoio social, liderança satisfação no trabalho, quanto maior o valor, melhor a situação (Tabela 3).

Tabela 3: dimensão positiva

Pontuação	Interpretação
0–33	Situação crítica
34–66	Intermediária
67–100	Boa situação

Fonte: COPSOQ II.

É importante a leitura integrada dos resultados e não observar as perguntas isoladas, procurando identificar padrões:

Alta demanda + baixo controle = risco de estresse

Baixo apoio social = risco psicossocial relevante

Alto conflito trabalho/família = impacto na saúde mental

Os resultados devem servir para orientar as ações do SESMT melhorando o clima organizacional, implantar um programa de saúde mental, treinamento de lideranças, redesenho das tarefas, prevenção da Síndrome de Burnout.

Fatores psicossociais vs. riscos psicossociais

De acordo com a Organização Internacional do Trabalho (2016), fatores psicossociais dizem respeito às características do trabalho e do ambiente organizacional, leva em consideração a carga de trabalho, autonomia, relações interpessoais e apoio social. Esses fatores não são necessariamente negativos, podem, inclusive, atuar como elementos protetores quando bem estruturados.

Já os riscos psicossociais estão relacionados à probabilidade de que esses fatores, quando desfavoráveis, causem danos à saúde física ou mental do trabalhador. Ou seja, o risco surge quando há exposição prolongada ou intensa a condições organizacionais inadequadas (Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho, 2014).

Segundo Dejours (1992), nesse sentido, a forma de planejar, organizar e gerir o trabalho, quando dimensionadas de forma inadequada, pode aumentar significativamente a probabilidade de adoecimento.

A identificação dos riscos psicossociais é um grande desafio na prática profissional. Enquanto riscos físicos podem ser medidos por instrumentos objetivos, os psicossociais envolvem percepções individuais e variam de acordo com a experiência de cada trabalhador (GOLLAC, 2011).

Uma mesma situação como uma meta de produção elevada, pode ser interpretada de maneiras distintas: para alguns, representa um estímulo positivo; para outros, uma fonte de estresse. Essa variabilidade torna o processo de avaliação mais complexo e exige o uso combinado de diferentes métodos (Warr, 2007).

Além disso, esses riscos raramente aparecem de forma isolada. É comum que sobrecarga de trabalho esteja associada à falta de autonomia, conflitos interpessoais ou insegurança no emprego, dificultando a análise de causa e efeito (OIT, 2016).

Sendo, portanto, esta subjetividade a principal dificuldade em identificar os riscos psicossociais, isto é, o mesmo fator de risco pode ser percebido de forma diferente por diversos trabalhadores, uma meta de produção elevada, pode ser percebido como um desafio motivador por um trabalhador ou uma ameaça por outro, de acordo com suas características individuais, experiências prévias e recursos de enfrentamento (Carlotto, 2019).

Além disso, os riscos psicossociais podem ter múltiplos fatores geradores que podem ou não estar inter-relacionados, desta forma a sobrecarga de trabalho dificilmente acontece isoladamente, quase sempre também se encontra falta de autonomia, conflitos interpessoais e insegurança no emprego. Esta inter-relação torna difícil identificar isoladamente o efeito de um único fator de risco sobre a saúde do trabalhador (Reis, A. L. P. P.; Fernandes, S. R. P.; Gomes, A. F, 2010).

3. METODOLOGIA

A avaliação dos riscos psicossociais neste estudo baseia-se na aplicação do Copenhagen Psychosocial Questionnaire – COPSOQ II (versão curta), instrumento utilizado internacionalmente para mensurar fatores psicossociais no trabalho de forma padronizada e validada (Silva, A. P. N.; Martinez, M. C.; Paraguay, A. I. B. B. 2003).

A aplicação do COPSOQ II respeitou princípios éticos, tais como: participação voluntária, consentimento informado, garantia de anonimato, uso coletivo dos resultados sem identificação individual.

Delimitação do Estudo: estudo de abordagem quantitativa**,** descritiva e transversal, cujo objetivo é avaliar a percepção dos trabalhadores sobre as condições psicossociais do ambiente de trabalho.

Os resultados permitem obter um retrato dos fatores psicossociais e desta forma subsidiar ações de gestão no âmbito do Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR).

Amostra: A população amostrada foi composta por 50 professores de uma escola técnica vinculados ao governo estadual.

Instrumento de Coleta – COPSOQ II (Versão Curta): é composto por dimensões que avaliam diferentes aspectos do ambiente psicossocial de trabalho, organizados em domínios:

Demandas do trabalho: quantitativas, ritmo de trabalho, demandas cognitivas e emocionais,

Organização e conteúdo do trabalho: influência no trabalho (autonomia), possibilidades de desenvolvimento, significado do trabalho,

Relações sociais e liderança: apoio social de colegas e superiores, qualidade da liderança, justiça organizacional,

Interface trabalho–vida pessoal: conflito trabalho-família,

Saúde e bem-estar: estresse, Síndrome de Burnout, satisfação no trabalho,

As respostas são em uma escala com cinco pontos, variando de frequência entre: sempre e nunca, ou intensidade: alta ou baixa. Este tipo de escala é denominado Likert, transforma dados subjetivos em dados quantificáveis.

Procedimentos de Coleta de Dados: foi realizada de forma eletrônica (formulários online). A aplicação do questionário foi precedida de uma campanha de sensibilização**,** explicando os objetivos da pesquisa, importância da participação e a inexistência de prejuízos individuais.

Tratamento e Análise dos Dados: os dados coletados foram organizados e analisados e transformados em escores padronizados, em escala de 0 a 100.

Interpretação dos Resultados: valores altos podem indicar maior exposição ao risco ou uma melhor condição de trabalho, dependendo da escala e foram complementados por entrevistas, grupos focais e observações do trabalho.

Os resultados obtidos com o COPSOQ II foram encaminhados para a direção e serão incorporados ao Gerenciamento de Riscos Ocupacionais, de acordo com a sequência a seguir:

Identificação de perigos**:** reconhecimento dos fatores psicossociais críticos,

Avaliação de riscos: análise da probabilidade e severidade dos impactos,

Plano de ação: definição de medidas preventivas e corretivas.

Além disso, recomenda-se que os resultados sejam devolvidos à organização e aos trabalhadores**,** promovendo transparência e engajamento nas ações de melhoria.

4. RESULTADO

Demandas no Trabalho: Os resultados indicaram níveis elevados de exigência laboral:

Demandas quantitativas: 78 (alto),

Ritmo de trabalho: 82 (muito alto),

Demandas emocionais: 75 (alto),

Esses dados evidenciam um cenário de sobrecarga e intensa exigência emocional.

Organização do Trabalho:

Influência no trabalho: 42 (moderado/baixo),

Possibilidades de desenvolvimento: 65 (alto),

Significado do trabalho: 88 (muito alto),

Apesar da baixa autonomia, os professores demonstram forte identificação com o trabalho.

Relações Interpessoais:

Apoio social dos colegas: 70 (alto),

Apoio da liderança: 55 (moderado),

Qualidade da liderança: 50 (moderado),

Confiança horizontal: 68 (alto),

Observa-se um ambiente colaborativo entre pares, porém com fragilidades na gestão.

Interface Trabalho–Indivíduo:

Conflito trabalho-família: 72 (alto),

Satisfação no trabalho: 60 (moderado),

Insegurança no emprego: 48 (moderado),

O resultado demonstra que o trabalho impacta significativamente a vida pessoal dos docentes.

Saúde e Bem-estar:

Estresse: 76 (alto),

Síndrome de Burnout: 71 (alto),

Saúde geral: 62 (moderado).

5. DISCUSSÃO

Os resultados indicam risco relevante de adoecimento mental, evidenciam um cenário que caracteriza a docência, onde as elevadas demandas e o desgaste emocional são uma constante. O que pode ser comprovado pela literatura que indicam a decência favorece o desenvolvimento de estresse crônico a Síndrome de Burnout.

A elevada pontuação no quesito “significado do trabalho” pressupõem que apesar das dificuldades, os profissionais mantêm uma relação positiva com sua profissão, fato que

atua como um fator protetivo. No entanto, esse fator não é suficiente para neutralizar os impactos negativos das altas demandas e da baixa autonomia.

A questão da fragilidade na liderança e o conflito trabalho-família indicam a necessidade de intervenções para alinhadas às diretrizes da nova NR-1 e às práticas de gestão de riscos psicossociais.

6. CONCLUSÃO

A gestão dos riscos psicossociais representa um dos principais desafios atuais na área de Segurança e Saúde no Trabalho. Sua natureza subjetiva e complexa exige que as organizações adotem uma abordagem mais ampla, que vá além dos modelos tradicionais centrados apenas em aspectos físicos do trabalho.

Ao longo deste estudo, foi possível observar que os professores estão expostos a um nível alto de risco psicossocial, com destaque para a sobrecarga de trabalho, exigências emocionais e indicadores de estresse e Síndrome de Burnout.

O estabelecimento do nexo causal entre trabalho e adoecimento mental continua sendo um ponto crítico, especialmente devido à influência de fatores individuais e externos ao ambiente laboral. Ainda assim, essa dificuldade não deve servir como justificativa para a inação.

A atualização da NR-1 reforça a responsabilidade das organizações na promoção de ambientes de trabalho saudáveis, destacando a importância de integrar os riscos psicossociais ao Gerenciamento de Riscos Ocupacionais.

Por fim, destaca-se que uma gestão eficaz depende não apenas de ferramentas técnicas, mas também do compromisso organizacional com a saúde mental, da capacitação dos profissionais envolvidos e da construção de um ambiente em que os trabalhadores se sintam seguros para expressar suas percepções e experiências.

REFERÊNCIAS

[1] CARLOTTO, P. A. C. Evidências de validade e precisão de um instrumento de avaliação de riscos psicossociais ocupacionais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

[2] REIS, A. L. P. P.; FERNANDES, S. R. P.; GOMES, A. F. Estresse e fatores psicossociais. Psicologia: Ciência e Profissão, v. 30, n. 4, p. 712-725, 2010.

[3] Silva, et al. Adaptação transcultural do COPSOQ II para o português brasileiro).

[4] KARASEK, R. A. Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. Administrative Science Quarterly, v. 24, n. 2, p. 285-308, 1979.

[5] SILVA, A. P. N.; MARTINEZ, M. C.; PARAGUAY, A. I. B. B. Validação/adaptação transcultural do COPSOQ para o português no Brasil. 2003

[6] Revista de Saúde Pública, Adaptação da versão curta do COPSOQ II para o Brasil, 2021.

[7] Jacinto, A; Tolfo, S. R; Riscos Psicossociais no Trabalho: Conceitos, Variáveis e Instrumentos de Pesquisa, 2017;

[8] Carlotto, P., A., C; Cruz, M., R.; Guilland, R.; Rocha, R., E., R., Riscos Psicossociais Relacionados ao Trabalho: perspectivas teóricas e conceituai, Revista Interamericana de Psicologia Ocupacional, 2018.

[9] Araújo, T., M.; Aquino, E., Menezes, G., Santos, C., O., Aguiar, L. Aspectos psicossociais do trabalho e distúrbios psíquicos entre trabalhadoras de enfermagem, 2003

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ADRIANA BRASIL VARGAS

Doutoranda em Engenharia Ambiental

ARIANE FERREIRA GONÇALVES

Mestrando em Engenharia Ambiental

ARIANE MENEZES AYRES

Mestranda em Engenharia Ambiental

CARLOS AUGUSTO DA SILVA MARINS

Mestrando em Engenharia Ambiental

CATIA FREDERICCI

Possui graduação em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1986), mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1992) e doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1997). Finalizou em maio/2005 a coordenação de um projeto de Pesquisa Inovativa na Pequena e Micro Empresa (PIPE/FAPESP), junto à empresa VITROVITA - Instituto de Inovação em Vitrocerâmicos Ltda. Atualmente é pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, atuando no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Núcleo Materiais Avançados. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Vidro e Cerâmica, atuando principalmente nos seguintes temas: vidro, síntese de pós, materiais odontológicos, materiais cerâmicos refratários., aglomeração de minérios de ferro. Atua em apoios tecnológicos junto às empresas realizando projetos de P&D&I e otimização de processos e produtos cerâmicos. Professora do Programa de Mestrado Profissional do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

AUTORES

CESAR YUGI NARITA

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (2010) , em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (2014) e em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (2020) . Atualmente é Pesquisador Pleno do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica , com ênfase em Metalurgia Extrativa. Atuando principalmente nos seguintes temas: biomassa, carbonização, Resíduos de coco e Carvão ativado.

DIOGENES DA SILVA OLIVEIRA

Mestrando em Engenharia Ambiental

FLAVIA TOSTES FONTES DE ANDRADE

Mestre em Engenharia Ambiental

HUGO PIMENTEL TAVARES

Doutorando em Engenharia Ambiental

IVAN MAURICIO DAZA PRADA

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Industrial de Santander (2017) na Colômbia. Mestrado em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2022). Atualmente é Pesquisador Junior do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2018) no Laboratório de Processos Metalúrgicos (LPM) da unidade de negócios Materiais Avançados (MA). Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Metalurgia Extrativa. Atuando principalmente nas áreas de pirometalurgia e aglomeração de materiais.

JEFFERSON DIAS GONÇALVES

Possui graduação em Engenharia Quimica pela Universidade Federal do Pará e mestrado em Engenharia de Processos também pela UFPA . Atualmente é técnico em laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - Campus Catanhal. Atua nas áreas de análises físicas, químicas e microbiológicas de água e solos para fins de fertilidade.

JESSÉ LUÍS PADILHA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (2006), graduação em Tecnologia Agroindústrial Enf. em Tec. de Madeira pela Universidade do Estado do Pará (2006), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (2009) e doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela Universidade Federal do Pará (2022). Atualmente é professor assistente da Universidade Federal do Pará. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Aproveitamento da Energia

JOÃO OTÁVIO COSTA ALMEIDA

Estudante de graduação de Engenharia Química no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas campus Pouso Alegre. Escritor do livro ''Uma frase, um aprendizado para vida'' de cunho filosófico, escritor do livro: ''Raízes e Ritos: Um olhar sobre a história de Santa Rita do Sapucaí'' trabalho historiográfico escrito com apoio da prefeitura local. Palestras em escolas com objetivo de aproximar o jovem a questões filosóficas. Tem mais proximidade com os temas: Filosofia, química, história, sustentabilidade e educação.

AUTORES

JORGE CRESO CUTRIM DEMÉTRIO

Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA/ São Luís - MA

JOSÉ ANTONIO POLETTO FILHO

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade São Francisco, Especialização em Engenharia e Segurança do Trabalho, pela Universidade de Campina (UNICAMP) , Mestrado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela FCA / UNESP- Campus de Bauru. Doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela FCA/ UNESP - Campus de Botucatu. Especialização em Meio Ambiente - Unicamp, Especialização em Higiene Ocupacional - USP, Especialização em Tecnologias de Informação e Comunicação, Educação Ambiental e Gerenciamento de Recursos Hídricos - UNESP, Especialização em Ergonomia - SENAC, Licenciatura - Mecânica - Fatec, Licenciatura - Segurança do Trabalho – Fatec. Tem experiência de trinta anos em Engenharia Mecânica, atuando nas áreas de Refrigeração, Ar Condicionado, Conforto Ambiental, Segurança no Trabalho, Meio Ambiente e Gestão do RSU, e de vinte anos na docência e gestão universitária

LUIS GUSTAVO FERREIRA ANASTACIO

Técnico em Mecânica Industrial (2020) e graduando em Engenharia Química pelo IFSULDEMINAS. Possui experiência na síntese e análise de subprodutos da transesterificação alcalina, atuando principalmente nos seguintes temas: oxidação de cálcio, síntese de polímeros e combustíveis sustentáveis. Atualmente é aluno de iniciação científica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais.

LUIZ FILIPPE CARDOSO BOTELHO

Mestrando em Engenharia Ambiental

MARCELO HENRIQUE GRANZA

Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa (2011), mestrado em Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa (2014) e doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2020). Atualmente é Professor do Magistério Superior da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava atuando nos cursos superiores de Tecnologia em Manutenção Industrial e Engenharia Mecânica. Atua como Diretor Geral da UTFPR do Campus Guarapuava. Tem interesse nas áreas de pesquisa de acionamento eletrônico de máquinas elétricas operando com controle vetorial, em conversores de potência aplicados em sistemas de energia renováveis, simulações numéricas, geração automática de código para plataforma Arduino e Processadores Digitais de Sinais, Conversores CA/CC com alto fator de potência, conversores integrados, conversores multiníveis.

MAURÍCIO MARLON MAZUR

Possui graduação em Tecnologia em Automação Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2010), mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2014) e doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2018). Foi professor substituto na área de manutenção industrial na Universidade Tecnológica Federal do Paraná durante dois anos (2019-2020) ministrando aulas no curso de Tecnologia em Manutenção Industrial. Tem experiência em Engenharia de Materiais, com ênfase em recobrimentos, atuando principalmente em temas como molhabilidade, plasma, sistemas de vácuo, esterilização, fontes de tensão, nanomateriais e filmes finos. Possui expertise na caracterização de filmes finos, utilizando técnicas analíticas como difração de raios X, Raman, microscopia eletrônica de varredura, entre outras. Realizou projetos no setor elétrico com aplicação de nanomateriais de oxidos e nitretos metálicos por plasma. Atualmente, é técnico de laboratório industrial no

AUTORES

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal do Paraná, no laboratório de materiais.

MAYSSA ALVES DA SILVA

Doutora em Engenharia Civil

MICHELLE FRANÇA RABELO CUNHA

Mestrando em Engenharia Ambiental

MIGUEL RODRIGUES PASCHOAL

Possui graduação em Química pela Universidade Federal do Pará (2017), Especialização Latu Senso em Metodologia do Ensino de Química pelo Centro Universitário Internacional (2019), Mestrado Profissional em Engenharia dos Materiais pelo IFPA (2023). Atualmente é técnico de laboratório/ciências do Laboratório de Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/ Campus Castanhal. Tem experiência na área de Química, com ênfase em experimentos de laboratório, atuando principalmente nos seguintes temas: Ensino de Química, Educação Ambiental e Reaproveitamento de Resíduos.

NATHALIA VIEIRA BARBOSA

Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre. Doutora em Química pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2022). Mestre em Química Analítica pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (2010 - Bolsista FAPESP). Bacharel e Licenciada em Química pela Universidade Federal de Viçosa - UFV (2008 - Bolsista CNPq). Atua na área de Química Analítica

NILO ANTONIO DE SOUZA SAMPAIO

Doutor em Engenharia Mecânica

PAULO ALVES GARCIA

Possui graduação em Engenharia Elétrica Modalidade Eletrônica pela Fundação Armando Álvares Penteado, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo. Atuou em empresas Multinacionais e Brasileiras na área de Automação, Controle e Instrumentação Industrial e Predial em cargos gerenciais em engenharia, operação e vendas. Foi responsável pela implantação de negócios e ampliação de mercado na área mencionada. Foi professor universitário em diversas instituições de nível superior. Atuou também como Professor e Coordenador dos cursos de Engenharia Elétrica e de Engenharia de Produção da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Atuou em desenvolvimento e gestão de pesquisas em Engenharia Elétrica. Foi avaliador do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP) de 2011 a 2023. Foi membro da Comissão Assessora de Área de Engenharia Elétrica - INEP para os exames ENADE de 2014, 2017 e 2019. É Perito Judicial em Engenharia Elétrica. Atualmente é Sócio- Gerente da empresa SGN - Soluções em Energia que atua na área de Energias Renováveis e Energia Solar, Professor Convidado na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie e Consultor na Proative-se Desenvolvimento e Gestão, empresa parceira da Escola Superior de Redes da RNP.

PAULO EMILIO TAVARES

Possui graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos pela Faculdade de Tecnologia Senai Nadir Dias de Figueiredo(2022). Atualmente é Gerente Técnico da P E Tavares Reforma de Fornos e Consultoria em Refratários. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica

AUTORES

RAPHAELA BARRETO VENANCIO

Graduanda no curso Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e integrante do grupo PET, onde colaboro na organização de eventos acadêmicos e desenvolvo atividades de monitoria e iniciação científica. Atualmente, minha pesquisa utiliza a linguagem Python para aplicações em processos químicos.

RENAN ANTUNES COSTA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará(2018). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica.

RODRIGO DE AZEVEDO NEVES

Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA/ São Luís - MA

RÔMULO CÉSAR DE ARAÚJO AZEVEDO

Graduado em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA/ São Luís - MA

ROSALVO FERREIRA DE OLIVEIRA NETO

Professor da Universidade Federal do Vale do São Francisco. Tem publicações em relevantes jornais e conferências internacionais: Expert Systems with Applications, Computers and Electronics in Agriculture, International Joint Conference on Artificial Neural Networks e International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. Também tem artigos publicados nos principais eventos organizados pela Sociedade Brasileira de Computação relacionados à área de Inteligência Artificial: Conferência Brasileira de Sistema Inteligente (BRACIS), Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames), Simpósio Brasileiro de Banco de Dados (SBBD), Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais (SBSeg) e Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI)

SANDRO ALBERTO VIANNA LORDELO

Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (2011), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (2013) e é doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (2019). Atualmente é professor da Universidade Federal Fluminense, campus Volta Redonda e pesquisador pelo Lapei/UFF e pelo LabCEO/UFF. Teve experiência como professor de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Ceará, campus Russas, da Faculdade Anhanguera, da Universidade Federal Fluminense, campus Petrópolis e do CEFET/RJ, campus de Nova Iguaçu. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, atuando principalmente nos seguintes temas: estratégia organizacional, empreendimentos complexos, lean, PCP, planejamento de projetos, jogos eletrônicos, mídia interativa, logística, engenharia da qualidade, produtividade, finanças, empreendedorismo, indústria 4.0 e transformação digital e data science.

SIDINEI SILVA

Professor Associado do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande. Tem desenvolvido trabalhos na área de programação em Python aplicada à engenharia química e inovação em propriedade industrial.

TATIANA DE FREITAS SILVA

Graduada em Química (Licenciatura e Bacharelado) pela Universidade Federal de Viçosa (2007) e Engenharia Química pela Universidade de Ribeirão Preto (2014). Especialista em Engenharia de

AUTORES

Segurança do Trabalho no Centro Universitário Estácio (2019). Mestre (2009) e doutora (2013) em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos. Pós doutora em Química pela Universidade de São Paulo (2015) e na Universidade Federal de Juiz de Fora (2017). Possui experiência no desenvolvimento de catalisadores, atuando principalmente nos seguintes temas: reforma a vapor, oxidação parcial e oxidativa do metano, reforma a seco do metano, reação de deslocamento gás-água (WGSR) e reação preferencial do CO (PROX-CO). Atualmente é professora substituta do IFSULDEMINAS - Campos Pouso Alegre.

TONY WANDERSON BARRETO DOS SANTOS

Profissional com mais de 16 anos de experiência na área de tecnologia, com ênfase em gestão de projetos e contratos, gestão de pessoas e de manutenção. Mestrando em Montagem Industrial e Linha de Pesquisa em Gerenciamento de Projetos Industriais pela Universidade Federal Fluminense, Certificado Project Management Professional (PMP) pelo Project Management Institute (PMI), com vivência em projetos destinados a empresas como Vale, Petrobras, RioGaleão, Globo, Anglo American, Audi, SEBRAE, SENAC, Amil, Cosan, Fast Shop, Mercedes, Unicred, SICOOB e outras. Habilidade em identificar as necessidades do cliente, planejamento, elaboração de projetos, soluções técnicas, aplicação de boas práticas do PMBOK, gerenciar e coordenar operações e manutenções de produtos além de desenvolver e testar novos produtos e processos. Grande conhecimento em Metodologias Ágeis, Framework Scrum, gestão de projetos, análise e gestão de processos de melhoria contínua.

VANESSA A. SANCHES CAMPASSI DE OLIVEIRA

Bacharel em Enfermagem pela Universidade de Marília, Mestre em Ensino e Saúde Faculdade de Medicina de Marília, Bacharel em Pedagogia - Faculdade Paulista, Especialista em Saúde da Família - Faculdade Iguaçu, Auditoria Hospitalar - Dom Alberto, Tutoria em Educação à Distância e Docência em Ensino Superior - Dom Alberto, MBA em Gestão Hospitalar -Universidade de Taubaté, Enfermagem do Trabalho - AVM Faculdades Integradas. Docente no Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, na ETEC Antônio Devisate (Marília-SP), com atuação no eixo tecnológico ambiente e saúde, docente no curso de Técnico em Enfermagem Etec Monsenhor Antônio Magliano e Coordenadora do curso Técnico em Segurança do Trabalho.

VIVIANE TELEGINSKI MAZUR

Professora do Magistério Superior na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Guarapuava desde 2017. Tecnóloga em Processos de Fabricação Mecânica (2010 - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Ponta Grossa), Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais (2012 - Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG), Doutora em Ciências e Tecnologias Espaciais (2016 - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/DCTA/ IEAv) e Pós-Doutora em Engenharia e Ciência de Materiais (2022 - Universidade Federal do Paraná - UFPR). Em colaboração estreita com empresas da região de Guarapuava, sobretudo do setor madeireiro, lidera o desenvolvimento de projetos em colaboração. Além disso, fortalece parcerias por meio da realização de trabalhos especializados, abrangendo ensaios de produtos em conjunto com as empresas locais. Essa sinergia impulsiona a troca de conhecimentos e experiências, contribuindo significativamente para o avanço mútuo no cenário tecnológico e industrial, com formação de recursos humanos e angariando contrapartidas para a Universidade. Possui experiência em processos de fabricação de revestimentos para proteção contra a corrosão e desgaste, bem como modificação de superfícies utilizando diferentes técnicas: Air Plasma Spray (APS), High-Velocity Oxi-Fuel (HVOF), laser (Yb:fibra, CO2), Plasma Transferred Arc (PTA), plasma magnetron sputtering, soldagem (MIG/MAG, TIG). Trabalha com revestimentos metálicos e cerâmicos, tais como Thermal Barrier Coatings (TBC), revestimentos obtidos camada a camada (manufatura aditiva), revestimentos com gradientes funcionais, refusão e texturização superficial. Atualmente é vice-coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas da UTFPR-CM-GP, ocupando também uma posição de professor permanente

AUTORES

WAGNER ROBERTO SANTOS DOS SANTOS

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (2018), graduação em TECNOLOGO EM GESTÃO DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL pelo CENTRO UNIVERSITÁRIO UNINTER (2011) e mestrado em engenharia de materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Pará (2019). Atualmente é técnico de laboratório área química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: elementos representativos, boxplot, analise exploratória de dados, periodicidade quimica e pca, hca, nmr spectrometry..

WESLEY WAGNER DE MELO LOPES

Estudante de graduação de Engenharia Química no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas campus Pouso Alegre. Possui ensino-medio-segundo-graupela Escola Estadual Cônego Paulo Monteiro(2019)

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson